

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Ottimizzazione parametri di taglio in processo di tornitura svolto
su componenti Aerospace**



Relatore:

Prof. Ing. Luca Iuliano

Candidato:

Pierpaolo Farina

Anno Accademico 2018/2019

Indice

1. Introduzione.....	5
1.1. Scelta del componente.....	5
2. Processo di tornitura	7
2.1. Parametri di tornitura	10
2.1.1. Geometria dell'utensile: nomenclatura, definizioni preliminari, angoli caratteristici e relativi valori tipici.....	10
2.1.2. Velocità di asportazione del materiale	19
2.1.3. Materiali degli utensili, avanzamenti e velocità di taglio, queste variano in relazione alle combinazioni di materiali del pezzo e dell'utensile.	19
2.2. Parametri di taglio	22
2.3. Centro di lavorazione	22
2.4. Part program – CNC.....	24
3. Usura degli utensili da taglio	28
3.1. Meccanismi di usura:	28
3.2. Zone di usura e durata del tagliente	29
3.3. Altri meccanismi di usura.....	34
3.4. Usura su inserti tondi	35
4. Regressione lineare multipla	36
5. Controllo statistico di processo e carte di controllo.....	42
5.1. Limiti di controllo	44
5.2. Carte di controllo per variabili.....	44
6. Strumenti e dispositivi impiegati.....	48
6.1. Centro di lavoro	48
6.2. Microscopio digitale.....	51
6.3. Macchina CMM 3D utilizzata	54
7. Caratteristiche della lavorazione	59
7.1. Geometria del componente.....	59
7.2. Identificazione fase da ottimizzare	60
7.3. Informazioni preliminari post presa visione del componente	61
7.3.1. Materiale del componente.....	62
7.3.2. Geometria e materiale inserto	65
7.4. Parametri di taglio	66
8. Pianificazione degli esperimenti ed esecuzione prove	68

9. Analisi sui valori assunti dall'usura	75
9.1. Svolgimento delle analisi sul software MINITAB	79
9.1.1. Regressione	79
9.1.2. Risultati analisi.....	81
9.1.3. Ri-adattamento del modello.....	93
10. Analisi dimensionale	99
10.1. Xbar-R Chart	99
10.1.1. Interpretazione dei risultati.....	100
10.2. I-MR Chart	101
10.2.1. Interpretazione dei risultati.....	101
10.3. Interpretazione della statistica e di grafici	102
10.3.1. test per cause speciali, presenza di:.....	103
10.4. Analisi e considerazioni	105
10.4.1. Componente <i>A</i>	105
10.4.2. Componente <i>B</i>	124
10.4.3. Considerazioni finali dopo l'analisi ed il confronto dimensionale con lo storico dei dati	143
11. Prove estese su di un intero lotto del componente B	144
11.1. Before/After Charts: I-MR Chart, Xbar-R Chart.....	145
Considerazioni sulle singole misure del diametro del foro.....	156
12. Considerazioni finali	168
Indice delle figure	169
Indice delle tabelle	173
Bibliografia	174
Ringraziamenti	175

1. Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è stato sviluppato in concomitanza ad una attività di tirocinio curricolare in azienda, presso la sede di Villar Perosa (TO) dell'azienda *SKF (Svenska KullagerFabriken)*, ovvero fabbrica svedese di cuscinetti).

L'azienda in questione è una delle leader mondiali nel settore della realizzazione di cuscinetti per i più disparati ambiti, tra cui l'industria aerospaziale e quella automobilistica.

Molto genericamente, tali dispositivi sono meccanismi utilizzati per la riduzione dell'attrito tra due oggetti in moto rotatorio o lineare fra loro.

Lo stabilimento, sede del tirocinio, include tre differenti divisioni che realizzano cuscinetti per le relative applicazioni:

- *SuperPrecisi*, per l'industria delle macchine utensili;
- *TBU*, per l'industria ferroviaria;
- *AVIO*, per l'industria aerospaziale.

L'attività di tirocinio ed il lavoro di tesi, sono state svolte presso la divisione *AVIO* dell'azienda, in particolare, sono state sviluppate in supporto alle attività svolte dall'ufficio del "*process engineering*" noto anche come ufficio tecnico.

All'interno di tale ufficio poi, le mansioni svolte sono principalmente state a supporto dell'area lavorazioni ad asportazione di truciolo, in particolare per ciò che concerne le lavorazioni di tornitura.

Per effettuarle sono stati necessari anche contatti con personale e relativi macchinari utilizzati, di linee di produzione e laboratorio.

1.1. Scelta del componente

Nella industria aerospaziale, non si ha una vera e propria produzione di serie per quanto riguarda la numerosità di componenti prodotti, a causa del fatto che la produzione avviene principalmente su commessa da parte di aziende del settore.

Quindi, al fine di svolgere una analisi rilevante e che agevolasse l'esecuzione di prove, si è optato per effettuare uno studio su di una tipologia di componente ad alto volume di produzione (sempre in relazione alle altre ed al settore di pertinenza) che avesse una tempistica di lavorazione non esageratamente lunga per poter effettuare delle valutazioni in tempi relativamente brevi.

Dalle considerazioni scritte precedentemente, la scelta è ricaduta su due cuscinetti a sfere a tre punti di contatto (costituiti entrambi da un anello interno e due semianelli esterni).

Tali cuscinetti sono prodotti, come per altri componenti del settore in questione, su commessa per una nota azienda del settore.

L'attività, in particolare, ha riguardato i relativi anelli interni, in quanto (a causa della geometria) sono meno sensibili al trattamento termico precedente la lavorazione in esame, in cui si ha asportazione di truciolo, permettendo di poter escludere all'interno delle analisi almeno la variabilità relativa ad esso.

La scelta di effettuare lo studio su due componenti è dovuta al fatto che questi hanno geometria pressoché identica, differiscono per ciò che riguarda le dimensioni, quindi le considerazioni su di uno si sono potute estendere sull'altro.

Tra le diverse lavorazioni eseguite sul componente, si è focalizzata l'attenzione sul processo di tornitura.

RICHIAMI TEORICI

2. Processo di tornitura

Si tratta di un processo di lavorazione di componenti per asportazione di truciolo, nel quale il componente da lavorare ruota durante la lavorazione.

Si utilizza per ottenere superfici di rivoluzione interne ed esterne di differenti forme e differenti qualità superficiali.

Caratteristiche:

- moto di taglio continuo, posseduto dal pezzo, cui parametro caratteristico è la velocità di taglio V_t ;

$$V_t = \pi * D * n / 1000 \text{ [m/min]}$$

$$\text{Con: } D \text{ [mm]; } n \text{ [giri/min]}$$

- moto di alimentazione, rettilineo o curvilineo, su di un piano passante per l'asse di tornitura, sempre posseduto dall'utensile. È dato dalla combinazione di due moti, parallelo e perpendicolare, all'asse di tornitura. Il suo parametro relativo è l'avanzamento a .

$$V_a = a * n \text{ [mm/min]}$$

$$a \text{ [mm/giro]; } n \text{ [giri/min]}$$

- Moto di appostamento dell'utensile, rettilineo, che serve per regolare la posizione dell'utensile rispetto al pezzo, caratterizzato dal parametro profondità di passata p espresso in mm.
- Moto di lavoro, dato dalla combinazione di moto di taglio e di alimentazione, che è un moto elicoidale.

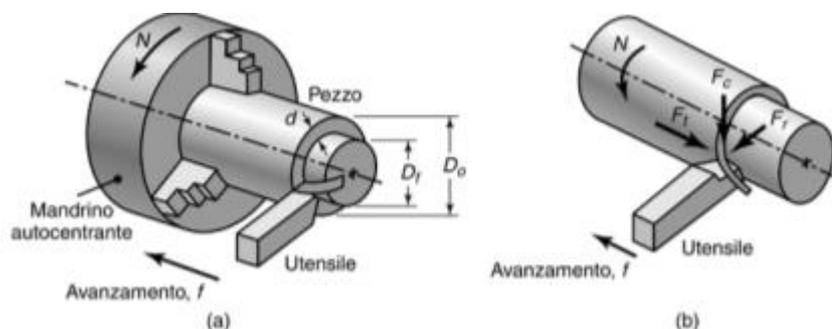


Figura 1. Moti caratteristici della lavorazione di tornitura.

Tipologie di operazioni di tornitura:

- Cilindrica esterna, di pezzi cilindrici, conici, profilati o con gole, quindi anche di superfici a forma complessa. Con moto di alimentazione parallelo all'asse di tornitura, se tornitura cilindrica esterna, o non parallelo, per la lavorazione di profili a geometria complessa.
- Piana esterna o sfacciatura, di superfici piane all'estremità di un pezzo, per favorire l'assemblaggio del componente con altri, o per la produzione di gole per anelli di tenuta toroidali (O-ring). Con moto di alimentazione perpendicolare all'asse di tornitura. Per tenere la velocità di taglio costante occorre variare la velocità angolare, che, nelle macchine tradizionali si riduce al ridurre del diametro.
- Tornitura interna, dove aumentando il rischio di vibrazioni, a causa delle sollecitazioni di flesso-torsione cui è soggetto l'utensile, occorre lavorare con valori di avanzamento e profondità inferiori rispetto alla tornitura esterna.
- Barenatura, per l'allargamento di fori già realizzati in altri processi.
- Filettature, esterne ed interne, realizzate a partire da superfici cilindriche. Con moto di alimentazione parallelo all'asse di tornitura ed avanzamento pari al passo.
- Esecuzione di gole esterne ed interne, su superfici già tornite, tramite inserti muniti di profilo sagomato.
- Esecuzione e lavorazione di fori, tramite utensili particolari, di solito si esegue post sfacciatura per realizzare il centraggio del pezzo per il montaggio di questo tra punta e contropunta.
- Troncatura, per tagliare o separare una porzione di materiale, ad esempio per realizzare degli spezzoni da una barra.
- Zigrinatura, per la modifica della geometria superficiale, tramite deformazione plastica, di una superficie cilindrica, come, ad esempio, per la produzione di manopole zigrinate.

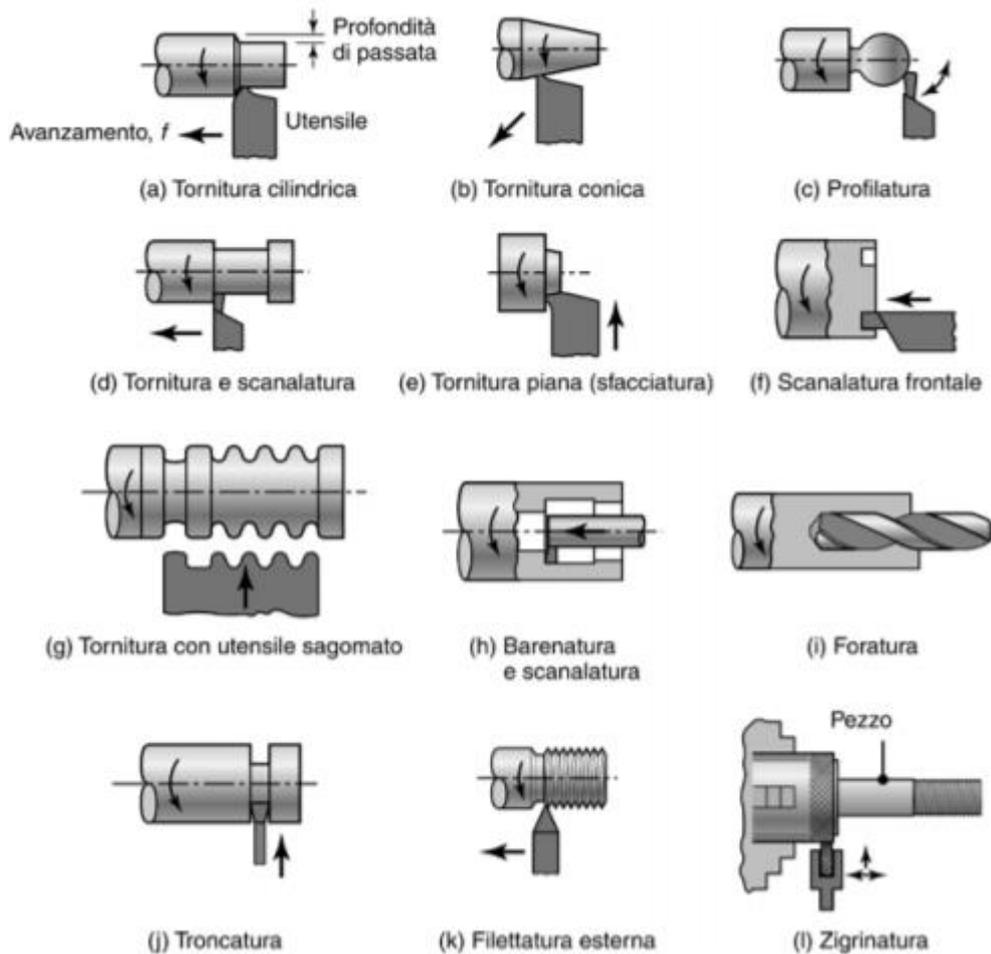


Figura 2. Tipologie di operazioni di tornitura.

A seconda della lavorazione effettuata, tra quelle sopra elencate, variano le tolleranze commerciali sulle superfici lavorate del componente.

In più, in base alla lavorazione svolta, ai materiali di pezzo ed utensile, all'accuratezza dimensionale ed alla finitura superficiale richieste, ed alle prestazioni della macchina utensile, variano i seguenti parametri:

- Velocità di rotazione del pezzo, n [rpm].
- Profondità di passata, p [mm].
- Avanzamento, a [mm/giro].

Dopo aver identificato la tipologia di lavorazione, solitamente questa si articola in operazioni di:

- Sgrossatura, per l'asportazione di grandi quantità di materiale, tramite alti avanzamenti ed alte profondità di passata, solitamente per ottenere la forma generale del pezzo.
- Finitura, per asportare volumi di materiale nettamente minori, quindi con parametri altrettanto inferiori, per raggiungere le specifiche geometriche, di accuratezza superficiale e dimensionale del componente.

2.1. Parametri di tornitura

2.1.1. Geometria dell'utensile: nomenclatura, definizioni preliminari, angoli caratteristici e relativi valori tipici

Definizioni

Si riportano le definizioni degli elementi caratteristici dell'utensile e dei suoi relativi angoli, in particolare rispetto alle lavorazioni di tornitura:

- Testa: parte dell'utensile in cui si trovano le superfici attive e i taglienti.
- Stelo: parte residua dell'utensile con funzione di appoggio sulla torretta portautensili.
- Collo: porzione di stelo di sezione ridotta rispetto allo stesso, ad esempio per torniture interne, contigua alla testa.
- Base: superficie dello stelo che poggia sul porta utensile.
- Faccia o petto: superficie attiva della testa sulla quale si forma e scorre il truciolo.
- Fianchi: superfici attive della testa in prossimità della faccia. Si distinguono in fianco principale, la superficie attiva prossimo alla superficie di lavorazione, e il fianco secondario, quella adiacente alla superficie lavorata.
- Taglienti: intersezioni della faccia con i fianchi. Si distinguono in tagliente principale, l'intersezione della faccia con il fianco principale, e tagliente secondario, l'intersezione della faccia con il fianco secondario.
- Profilo: linea costituita dal tagliente principale e secondario.
- Punta: punto di intersezione tra il tagliente principale e il tagliente secondario: fra i due taglienti è normalmente presente un raggio di raccordo.

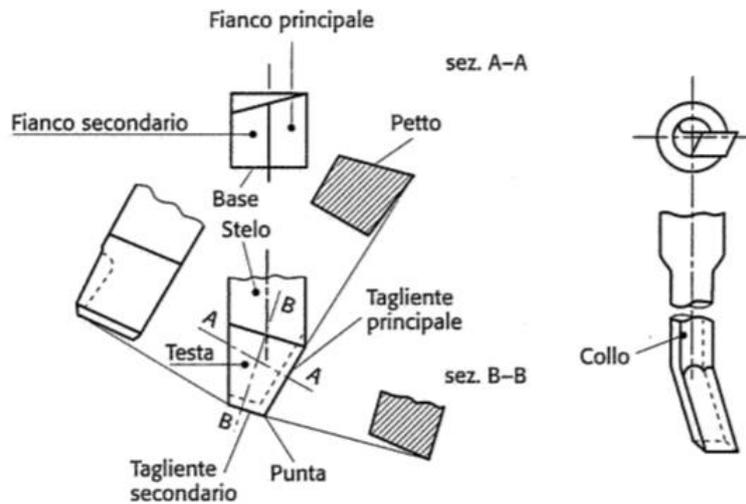


Figura 3. Elementi caratteristici utensile.

Angoli caratteristici

Gli angoli caratteristici dell'utensile sono definiti tramite un sistema di riferimento costituito dall'asse dello stelo e un piano passante per la punta dell'utensile, parallelo al piano di base. Per gli utensili monotaglienti possono essere classificati in angoli: della sezione normale, del profilo e di registrazione.

Angoli della sezione normale

Si hanno:

- γ : angolo di spoglia superiore. Formato dalla faccia con il piano di riferimento, misurato in una sezione $A - A$ normale alla proiezione del tagliente principale sul piano di riferimento. Si considera positivo se la faccia si trova al di sotto del piano di riferimento, negativo se al disopra.
- α : angolo di spoglia inferiore principale. Formato nella sezione $A - A$ dal fianco principale con un piano contenente il tagliente principale e perpendicolare al piano di riferimento.
- α' : angolo di spoglia inferiore secondario. Formato dal fianco secondario con un piano contenente il tagliente secondario e normale al piano di riferimento, misurato in una sezione $B - B$ normale alla proiezione del tagliente secondario sul piano di riferimento.
- β : angolo di taglio. Formato dalla faccia con il fianco principale, nella sezione $A - A$. Si ha per costruzione che $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$.

Angoli del profilo

Si hanno:

- Ψ : angolo del tagliente principale. Preso sul piano di riferimento.
- Ψ' : angolo del tagliente secondario. Preso sul piano di riferimento.
- ε : angolo tra i taglienti. Preso sul piano di riferimento.

- λ : angolo di inclinazione del tagliente principale. Formato dal tagliente principale con il piano di riferimento. Si considera positivo se il tagliente si trova al disotto del piano di riferimento, negativo se al disopra.

Angoli di registrazione

- χ : angolo di registrazione del tagliente principale. Formato sul piano di riferimento dalle proiezioni del tagliente principale e della superficie lavorata.
- χ' : angolo di registrazione del tagliente secondario. Preso anch'esso sul piano principale.

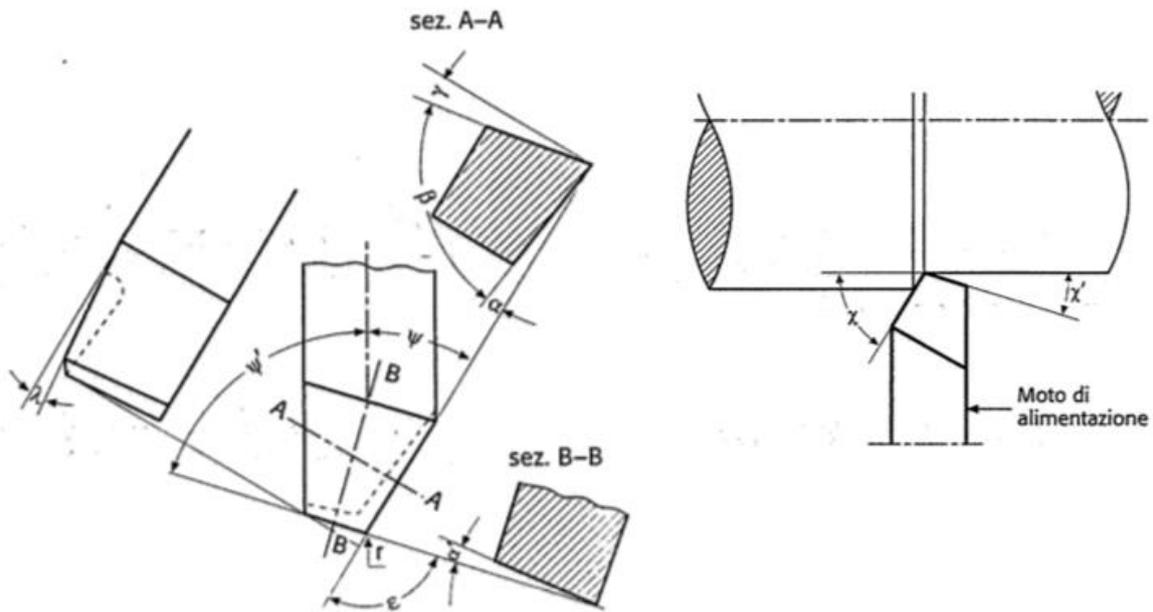


Figura 4. Angoli di: sezione normale, profilo e registrazione.

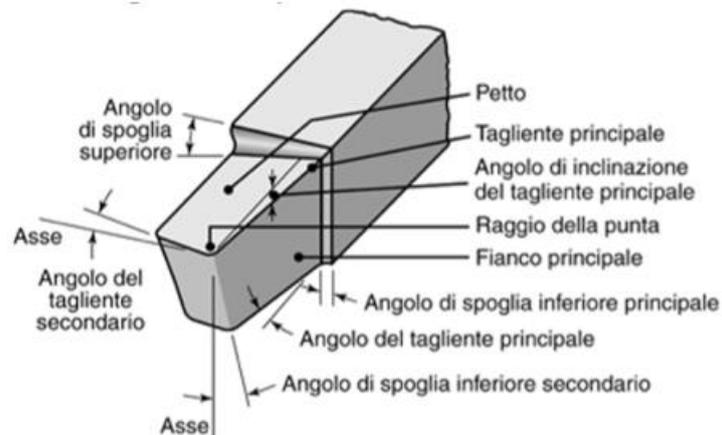


Figura 5. Geometria dell'utensile: vista 3D.

Caratterizzazione dei singoli angoli

- Angolo di spoglia inferiore principale α

La realizzazione della superficie lavorata è data a un moto elicoidale, risultante dal moto di taglio e dal moto di alimentazione. L'utensile descrive un'elica definita dall'avanzamento a e dal diametro D del pezzo. Dalla figura sotto è evidente che il segmento OL , sul piano tangente alla superficie in lavorazione, è inclinato, rispetto alla perpendicolare OR all'asse $x-x$ del pezzo, di un angolo ϕ . Tale angolo riduce l'ampiezza dell'angolo di spoglia inferiore principale al valore effettivo $\alpha - \phi$. Dalla figura risulta:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{a}{\pi D}$$

Per i comuni lavori di tornitura l'angolo ϕ è in generale $< 1^\circ$. Nelle lavorazioni di filettatura, invece, assume valori rilevanti.

L'angolo di spoglia inferiore del tagliente principale deve essere maggiore dell'angolo ϕ , di inclinazione del moto elicoidale di lavoro, perché non è ammissibile lo strisciamento del fianco principale sulla superficie di taglio.

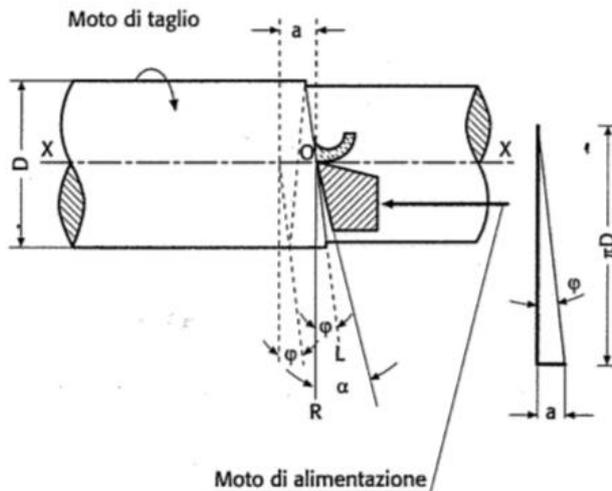


Figura 6. Angolo di spoglia inferiore principale.

Tale angolo è funzione del tipo di materiale in lavorazione, poiché maggiore è la pressione sviluppata durante il taglio, maggiore deve essere la sezione resistente dello spigolo tagliente dell'utensile, ciò si ottiene per piccoli valori di α , e viceversa. In relazione alla durezza del materiale in lavorazione, si ha che per:

- Materiali molto duri: α deve essere piccolo, circa 5° , con conseguente piccolo ritorno elastico della superficie di taglio, occorre una sezione resistente elevata per evitare rotture;
- Materiali poco duri: α deve essere grande, circa 10° - 20° , con conseguente elevato ritorno elastico della superficie di taglio con rischio di strisciamento (non ammissibile), si ha basso rischio di rotture.

- Angolo γ di spoglia superiore

Tale angolo è uno dei più importanti angoli caratteristici dell'utensile poiché determina, insieme all'angolo λ di inclinazione del tagliente principale, la posizione del petto dell'utensile rispetto alla superficie di riferimento ed ha diretta influenza sul meccanismo di formazione del truciolo e quindi sui parametri di taglio.

Tanto maggiore è l'angolo di spoglia superiore, tanto minore è la deformazione prodotta e le forze necessarie a produrla; inoltre è minore anche l'attrito di scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile, successivo alla riduzione della pressione di taglio supportabile dal tagliente, nonostante la corrispondente riduzione della sua sezione resistente.

Riducendo il lavoro di deformazione e l'attrito di scorrimento del truciolo, si ha una minor potenza assorbita nel taglio e conseguentemente anche a una minor temperatura di taglio all'interfaccia truciolo-utensile.

Con alti valori dell'angolo γ è possibile incrementare i parametri di taglio con i conseguenti vantaggi produttivi.

Quindi, risulta la convenienza di adottare un angolo γ più grande possibile, compatibilmente però con la resistenza dello spigolo tagliente, che si riduce all'aumentare di tale angolo.

Al ridursi della tenacità del materiale da tagliare, conviene aumentare tale angolo.

Da quest'ultima affermazione esulano alcuni materiali "difficili" da tagliare (ad es. alcuni acciai inossidabili ricotti e acciai al manganese, (a)), per i quali la pressione di taglio risulta applicata più vicino allo spigolo di taglio rispetto a quanto avviene nella lavorazione di altri materiali "non difficili" da tagliare (b).

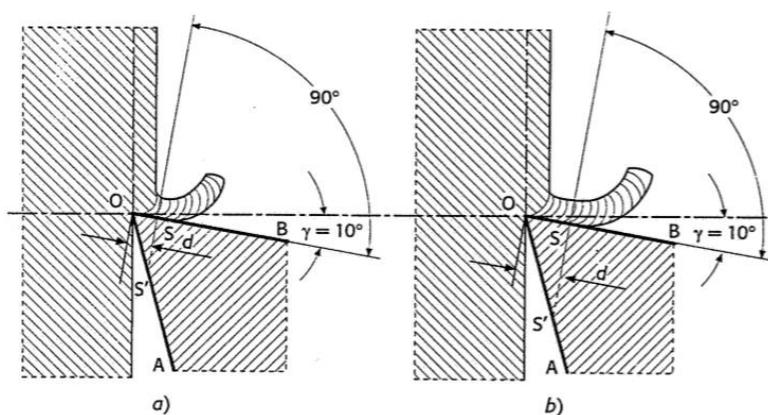


Figura 7. Angolo di spoglia superiore: lavorazione di materiali di durezza differente.

Per ovviare a tale inconveniente, impedendo che lo spigolo dell'utensile, sollecitato da un eccessivo sforzo di taglio, si rompa, si riduce il valore dell'angolo γ , ottenendo così una sezione resistente SS' di maggior ampiezza.

Valutando la dipendenza dell'angolo di spoglia superiore dal materiale dell'utensile, si può concludere che al ridursi della tenacità del materiale dell'utensile deve aumentare la sezione resistente dell'utensile stesso (con conseguenti valori di γ piccoli).

Inoltre, alcuni materiali per utensili, come i ceramici, possono essere sollecitati esclusivamente a compressione e non a taglio: da ciò deriva che l'angolo γ deve essere negativo, in modo da assicurare tale sollecitazione dello spigolo tagliente.

È anche rilevante che la distanza d del cratere di usura dal tagliente, oltre ad aumentare al crescere dell'avanzamento a , varia anche con il variare dell'angolo γ .

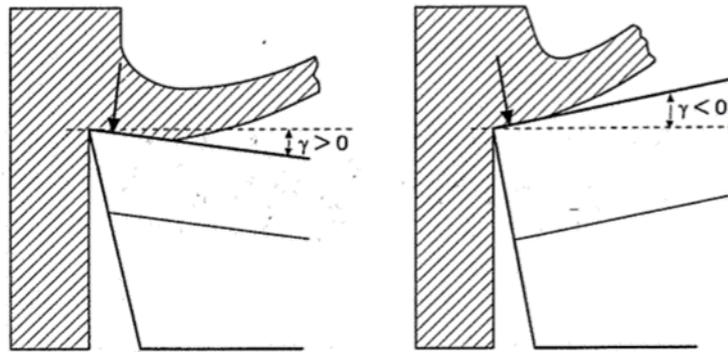


Figura 8. Angolo di spoglia superiore: positivo e negativo.

- **Angolo ψ del tagliente principale**

Tale angolo influenza le componenti della forza di taglio. Su di un utensile con $\psi=0$, agiscono due sole componenti di tale forza: la forza principale di taglio F_z e la resistenza all'avanzamento F_x , più precisamente, il raggio di raccordo sulla punta dell'utensile origina una piccola componente F_y di repulsione. Invece, su di un utensile con $\psi>0$, agisce anche una componente F_y di repulsione non trascurabile.

Per la realizzazione di uno spallamento su un elemento cilindrico (come nella figura sotto) è indispensabile che l'utensile sia a coltello, quindi con $\psi=0$, almeno nella fase di finitura, o ancor meglio che l'utensile abbia un angolo $\psi<0$ per poi effettuare una successiva operazione di sfacciatura.

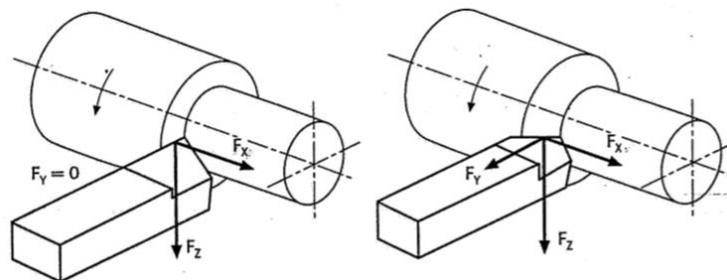


Figura 9. Angolo ψ del tagliente principale: influenza sulle forze di taglio.

- **Angolo λ di inclinazione del tagliente principale**

Tale angolo influenza la robustezza della punta dell'utensile: ad esempio, per l'utilizzo di inserti in materiale ceramico, che devono essere sollecitati solo a compressione, occorre che l'angolo λ sia negativo, con entità tale da assicurare la sollecitazione a compressione e non a taglio della punta dell'utensile.

Assieme all'angolo ψ del tagliente principale, tale angolo è in grado di orientare la direzione di deflusso del truciolo di materiali che originano una formazione di truciolo continuo, tale tipologia di truciolo, detto anche fluente, è in grado di provocare una serie notevole di inconvenienti.

Considerando, ad esempio, un utensile a coltello ($\psi=0$), si possono avere differenti casi.

- In un primo (*a*), si ha $\lambda > 0$: dove la direzione di deflusso del truciolo è orientata dalla superficie lavorata verso l'esterno.
- Con $\lambda < 0$ (*b*), invece, la direzione di deflusso del truciolo è orientata contro la superficie lavorata, il che rappresenta un notevole inconveniente, soprattutto nelle lavorazioni di finitura.
- Nel caso in cui anche $\lambda = 0$ (*c*), il truciolo ha la tendenza a defluire quasi parallelamente alla superficie lavorata, formando una tipologia di truciolo detta "a molla d'orologio", che si rompe quando il suo diametro diviene abbastanza grande.

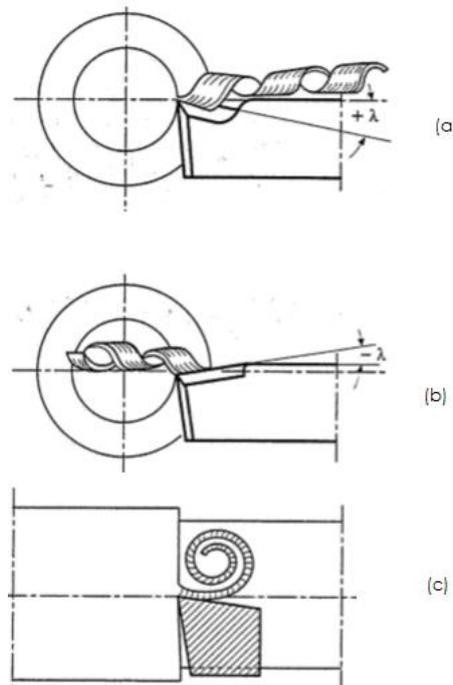


Figura 10 Angolo di inclinazione λ : deflusso del truciolo.

Valori consigliati dell'angolo di inclinazione λ :

- λ negativo (tra 3° e 15°), quando occorre rendere robusta la punta dell'utensile, come nel caso dei materiali ceramici, e non è indispensabile l'allontanamento del truciolo dalla superficie lavorata, ad esempio, grazie alla presenza di un rompitruciolo. Un angolo λ negativo, però, comporta anche l'aumento della forza di repulsione F_y ; componente che, con un sistema macchina – pezzo – utensile poco rigido, può rendere la lavorazione difficoltosa a causa dell'instaurare di vibrazioni, da cui il consiglio, in questo caso, dell'utilizzo di un angolo di inclinazione $\lambda=0$.
- λ positivo (tra 3° e 12°) quando occorre orientare il deflusso del truciolo in maniera tale da allontanarlo dalla superficie lavorata.

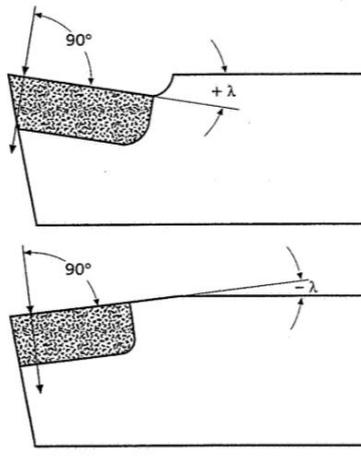


Figura 11. Angolo di inclinazione λ : positivo e negativo.

- **Angoli χ e χ' di registrazione dei taglienti principale e secondario**

Tali angoli definiti in precedenza come gli angoli formati dalle proiezioni della superficie lavorata e del tagliente principale, e secondario, sul piano di riferimento, sono funzione dell'angolo ψ e ψ' e del particolare profilo tornito dall'utensile.

Essi, insieme all'avanzamento a e al raggio di raccordo della punta r , determinano, in condizioni teoriche di lavorazione, quindi in assenza di vibrazioni ed imprecisioni della macchina, la geometria della superficie lavorata, ovvero la rugosità teorica. Essa viene espressa tramite l'indice R_t^* che rappresenta l'altezza delle irregolarità superficiali.

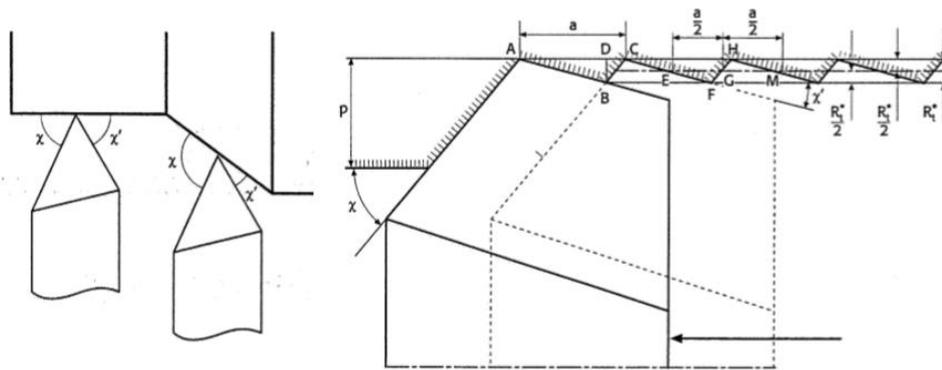


Figura 12. Geometria per calcolo della rugosità teorica.

Nel caso di assenza di raggio di raccordo sulla punta dell'utensile, R_t^* si può determinare come segue:

$$\begin{aligned} AD &= BD \cotg \chi' \\ DC &= BD \cotg \chi \end{aligned}$$

Si ha che:

$$AD + DC = BD (\cotg \chi + \cotg \chi')$$

Sostituendo le relazioni sotto:

$$\begin{aligned} AD + DC &= AC = a \\ BD &= R_t^* \end{aligned}$$

Si ottiene:

$$R_t^* = (a / \cotg \chi + \cotg \chi') \cdot 10^3 (\mu m)$$

Si ha che R_t^* , in assenza di raggio di raccordo della punta, si riduce al diminuire dell'avanzamento e degli angoli di registrazione.

2.1.2. Velocità di asportazione del materiale

Nota anche come *Material Removal Rate MRR*, che esprime il volume di materiale asportato nell'unità di tempo.

$$MRR = 1000 * p * a * Vt \text{ [mm}^3\text{/min]}$$

Con:

- D_m : diametro medio tra il valore del diametro esterno, iniziale, e quello interno, finale, espresso in [mm]
- p : profondità di passata, espressa in [mm].
- a : avanzamento, espresso in [mm/giro].

2.1.3. Materiali degli utensili, avanzamenti e velocità di taglio, queste variano in relazione alle combinazioni di materiali del pezzo e dell'utensile.

Si elencano le principali caratteristiche tecnologiche necessarie affinché tali materiali possano efficacemente ed economicamente svolgere le loro funzioni:

- Durezza a caldo: i materiali degli utensili devono avere una durezza maggiore di quella del pezzo, e devono mantenerla anche ad elevate temperature, che si raggiungono in corrispondenza del tagliente. Inoltre, sempre ad alte temperature è necessario che non si verificano delle saldature tra utensile e pezzo (materiali inerti).
- Resilienza o tenacità: è capacità di resistere a piccoli urti e vibrazioni, presenti durante il processo di lavorazione. È una proprietà complementare alla durezza.
- Resistenza all'usura: è la capacità di mantenere pressoché inalterate nel tempo le superfici e gli spigoli di taglio. In tale caratteristica rientrano anche l'inerzia chimica, rispetto al materiale del pezzo, la resistenza all'ossidazione e la stabilità chimica. La resistenza all'usura è un parametro particolarmente importante poiché la durata dell'utensile è strettamente legata all'andamento dell'usura.

Acciai fortemente legati

Presentano medi tenori di carbonio (0.7–0.9%) ed elementi di lega in percentuali superiori al 5%. Dalla loro introduzione, all'inizio del '900, le velocità di taglio furono aumentate notevolmente, poiché questi permisero di operare a temperature superiori a quelle tollerabili dagli acciai fino ad allora utilizzati, quindi anche gli stessi processi produttivi risultarono più rapidi, più efficienti ed economicamente più convenienti.

Per tale motivo, questi materiali furono denominati acciai rapidi (*HSS: High Speed Steel*) ed acciai superrapidi, in caso di presenza di un elevato tenore di cobalto.

Nonostante ciò, non presentano una durezza superiore a quella degli acciai al carbonio per utensili (hanno però una buona resilienza), distinguendosi da essi per la capacità di conservarla anche ad alte temperature (500°C acciai rapidi, 600°C acciai superrapidi).

Per conferire all'acciaio le necessarie proprietà tecnologiche sono presenti numerosi elementi di lega, tra i più importanti:

- Carbonio: che può essere presente come carbonio elementare, sotto forma di grafite, o come carburo di ferro Fe_3C , cementite. Esso aumenta la durezza a freddo ma riduce la tenacità dell'acciaio.
- Tungsteno (12–21%): è l'additivo costantemente utilizzato in tutti gli acciai rapidi. La sua presenza consente di aumentare la durezza a caldo, a seguito di formazione, durante il processo di tempra, di carburi stabili di tungsteno (WC) e carburi complessi di Fe e W , di varia composizione.
- Molibdeno (0.5–1.1%): ha un'influenza simile a quella esercitata dal tungsteno, con formazione di carburi doppi di Fe e Mo e più difficilmente di un carburo stabile. Migliora alcune caratteristiche dell'acciaio, quali la resistenza all'usura e la durezza a caldo.
- Cobalto (2.5–17%): non forma carburi, ma dà luogo a una soluzione continua di ferrite nell'austenite. Incrementa la stabilità dell'intera struttura alle alte temperature, consentendo di aumentare ulteriormente la durezza a caldo.

Carburi metallici sinterizzati

Materiale, paragonabile al diamante per quanto riguarda la durezza e resistenza all'usura, fu chiamato *Widia*, dal tedesco *wie diamant*, come il diamante, per metterne in evidenza tale affinità.

È ancora oggi senza dubbio il materiale più utilizzato per gli utensili e macchine ad alta produttività, poiché unisce elevate caratteristiche meccaniche a ottime proprietà di taglio.

Gli elementi principali costituenti i primi esemplari di carburi metallici sinterizzati furono: carburo di tungsteno (WC , fino al 94%), con elevata durezza e resistenza all'azione abrasiva del truciolo, e cobalto (6 – 10%), costituente il legante metallico per i grani di carburo.

In seguito a prove di taglio si riscontrò la necessità di introdurre altre tipologie di carburi, tra cui il carburo di titanio (TiC), capace di incrementare la resistenza all'usura del tagliente (riducendone però la tenacità).

Per incrementare ancora di più le prestazioni di questi materiali, oggi sono molto diffusi i carburi rivestiti, poiché si aveva il problema che ad elevate temperature i carburi, a causa di una buona affinità con l'acciaio, portassero a problemi di diffusione atomica. Oggi, sono quindi rivestiti da composti ossidi e carburi quali il carburo di titanio TiC , il nitruro di titanio TiN e ossido di alluminio Al_2O_3 , che conferiscono anche un'ottima resistenza all'usura ed una buona tenacità.

I sinterizzati ottenuti hanno una notevole resistenza all'usura e alla compressione, con durezze che si mantengono pressoché costanti fino a temperature di taglio di circa $1000^\circ C$, ma sono contraddistinti da una bassa tenacità, una limitata resistenza agli sbalzi termici e un costo relativamente elevato.

Materiali ceramici

Le ceramiche da taglio molto utilizzate nelle lavorazioni ad asportazione di truciolo, grazie alla loro elevata resistenza alle sollecitazioni di compressione e alla loro elevata refrattarietà, sono

utilizzate espressamente per la lavorazione di materiali a durezza molto elevata. Allo stesso tempo però presentano un'estrema fragilità.

Sono per lo più costituiti da ossido di alluminio, o allumina, o da ossidi alcalino terrosi, ottenuti per sinterizzazione.

Sono caratterizzati da un'elevatissima durezza ($HV\ 2000$) e una notevole resistenza all'usura, che consente di lavorare ad altissime velocità di taglio.

CBN: Cubic Boron Nitrate

Il nitruro cubico di boro possiede un'elevatissima durezza, inferiore solo al diamante, è chimicamente inattivo, quindi può essere adoperato per la lavorazione di materiali ferrosi. Può lavorare a temperature anche oltre i $1200^{\circ}C$, ma è molto costoso.

Diamante

Il diamante è il materiale che presenta la massima durezza in natura, quindi si presta molto bene a essere utilizzato quale utensile per il taglio dei metalli. Nonostante ciò, il suo utilizzo è limitato dall'estrema fragilità della sua struttura: sono necessarie per questo motivo macchine utensili particolarmente veloci, stabili ed esenti da vibrazioni, ed è raccomandata una lubrificazione abbondante con olio da taglio o petrolio.

Il diamante viene utilizzato come materiale da utensile per lo più per la lavorazione di leghe leggere.

Il suo uso è inoltre limitato dal suo elevato costo e dall'innescarsi di fenomeni di diffusione del carbonio nell'acciaio ad elevate temperature.

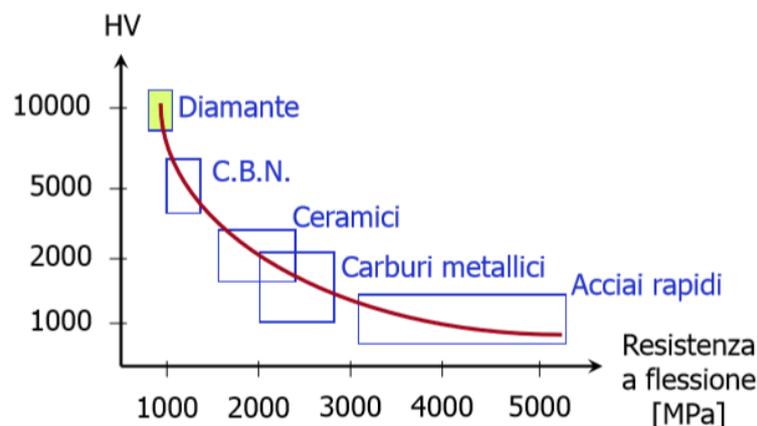


Figura 13. Durezza Vickers dei materiali per utensili in funzione della resistenza a flessione.

2.2. Parametri di taglio

Deve essere scelta la terna più opportuna, che deve tener conto dei limiti tecnologici del sistema macchina-pezzo-utensile, in particolare:

- La velocità angolare, che deriva dalla scelta della velocità di taglio e dal diametro del tornito, che deve tener conto della massima velocità disponibile sulla macchina e delle condizioni di stabilità del pezzo, che sono variabili in funzione di peso, forma, dimensioni ed eccentricità del pezzo ed anche del metodo di bloccaggio utilizzato.
- Combinazione di avanzamento e profondità di passata, che non devono originare una forza di taglio tale da provocare deformazioni eccessive di pezzo, utensile, e/o causare lo spostamento del pezzo dal suo bloccaggio o l'insorgere di fenomeni vibratori pericolosi.
- La combinazione globale dei parametri di taglio deve essere compatibile con la coppia e la potenza disponibili al mandrino della macchina.

2.3. Centro di lavorazione

Si tratta di una macchina utensile a controllo numerico, che permette l'esecuzione di lavorazioni di asportazione su differenti superfici, in diverse posizioni, con diversi orientamenti del pezzo.

In essi il pezzo è fissato ad una tavola portapezzo trasferibile, detta pallet, orientabile in tre direzioni principali e rotante attorno ad uno o più assi, mentre i diversi utensili sono portati in prossimità di esso per l'esecuzione della singola lavorazione.

Alla fine di questa, il pallet con il pezzo finito viene scaricato e ne viene caricato uno con un pezzo da lavorare, il tutto tramite un sistema automatico di cambio pallet.

Tali centri, sono muniti di sistema di cambio utensile automatico programmabile, hanno un magazzino utensili per la maggior parte dei casi a catena dal quale vengono prelevati in automatico gli utensili, scegliendo il percorso più breve per raggiungere il mandrino.

Il dispositivo di cambio utensile, di solito, è il braccio scambiatore, che tramite rotazioni preleva l'utensile (ognuno munito di suo portautensile) posizionandolo nel mandrino. Questi sono identificati da codici posti sul portautensili. Il tempo di cambio è dell'ordine di pochi secondi.

Sono presenti, in alcuni casi, anche sistemi di controllo dell'utensile per compensare variazioni, ad esempio, dovute all'usura ed alle dimensioni effettive degli utensili. Questo mediante sistemi di misura basati su tastatori a contatto.

Di solito i centri di lavorazione sono suddivisi in due tipologie in relazione all'asse del mandrino, verticale o orizzontale, e la dimensione massima raggiungibile dall'utensile attorno al pezzo è nota come volume di lavoro del centro di lavorazione.

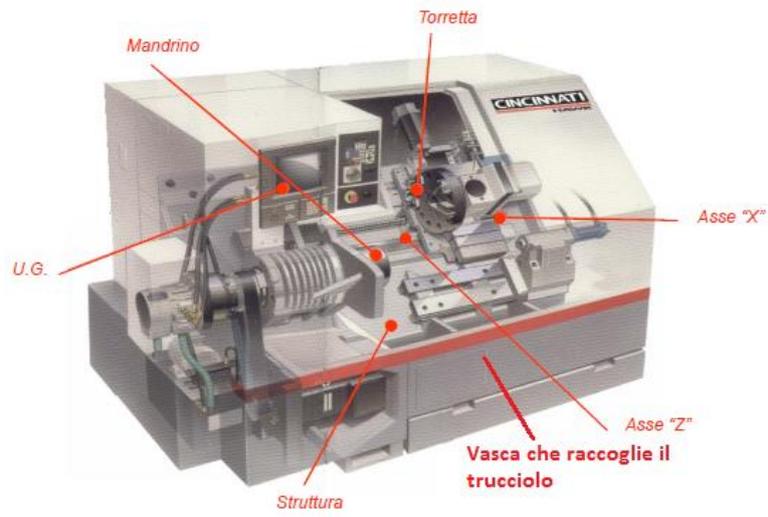


Figura 14. Centro di lavorazione ad asse orizzontale.



Figura 15. Centro di lavorazione ad asse verticale.

2.4. Part program – CNC

È il programma che si dà “in pasto” al centro di lavoro, per effettuare la lavorazione richiesta.

Viene generato tramite un software *CAM*, che mediante un post-processore, trasforma il percorso utensile in linguaggio macchina.

Tale programma, o listato, in quanto elenco di operazioni, è un insieme di righe testuali, dette blocchi, discriminate da precisi lessico e sintassi, espresse secondo il linguaggio *EIA/ISO*, comunemente utilizzato nelle macchine a controllo numerico.

Lessico organizzato in parole composte da prefisso alfabetico e suffisso numerico.

Per ciascun blocco è presente una istruzione di tipo *N* all’inizio, che costituisce una specie di contatore relativamente al numero di righe che costituiscono il programma.

Dopo *N* è presente una istruzione preparatoria di tipo *G* che predispone la macchina ad effettuare una lavorazione, che può essere di due tipi:

- Modale, il cui effetto permane fintanto non viene modificato o annullato da una funzione alternativa, per snellire la programmazione senza ripetere per ogni comando la stessa funzione. Ad esempio, per le istruzioni di movimento (*G00*, *G01*, *G02*, *G03*)
- Non modale, se l’effetto si esaurisce al termine della funzione, ovvero al passaggio alla riga successiva. Ad esempio, *G04* che comanda un tempo di sosta programmato nel controllo degli assi.

Non tutte le funzioni *G* sono assegnate dal linguaggio *EIA/ISO*, ma solo quelle legate ai movimenti elementari. Le restanti libere possono essere assegnate dal costruttore della macchina o dall’operatore, ai fini della gestione di cicli fissi di lavorazione.

Dopo le funzioni preparatorie di movimento, bisogna indicare l’asse o gli assi da movimentare, correlati da un numero che esprime la quota in *mm* che deve essere raggiunta.

Tale quota può essere uno spostamento differente a seconda dell’origine (fissa o mobile) del sistema di riferimento adottato:

- Di tipo assoluto, corrispondente ad avere l’origine del sistema di riferimento fissa, se l’istruzione viene letta dopo una funzione di tipo *G90*.
- Di tipo incrementale, rispetto all’ultima posizione raggiunta dall’asse, quindi con origine del sistema di riferimento mobile, se è già attiva una funzione di tipo *G91*.

La velocità di percorrenza della traiettoria per raggiungere la quota definita è dettata dalla funzione *F* (da feed, avanzamento), espressa in *mm/giro* nel caso di tornitura.

Nel caso di utilizzo della funzione *G00* non occorre specificare la velocità degli assi perché in tale funzione è sottinteso che deve essere raggiunta la quota definita alla massima velocità ammissibile, dipendente dalle caratteristiche della macchina.

Per effettuare la lavorazione, sono presenti due ulteriori funzioni, la *S* che imposta la velocità di rotazione del mandrino (o velocità di taglio) espressa in *m/min* e la funzione *T*, che, seguita dal numero che ne definisce la posizione nel magazzino, imposta l'utensile che verrà utilizzato.

Oltre alle funzioni base finora descritte, vi sono anche funzioni di tipo *M*, dette miscelanee, che gestiscono l'attivazione e la disattivazione delle varie utenze necessarie all'esecuzione della lavorazione, come, ad esempio, quella del fluido lubro-refrigerante. (*M08*: attivazione, *M09*: disattivazione)

Anche per queste funzioni miscelanee è presente la distinzione tra i due tipi modale e non.

ESEMPIO PROGRAMMA DI LAVORAZIONE

Si consideri una lavorazione al tornio di contornatura, rappresentata nell'immagine di seguito:

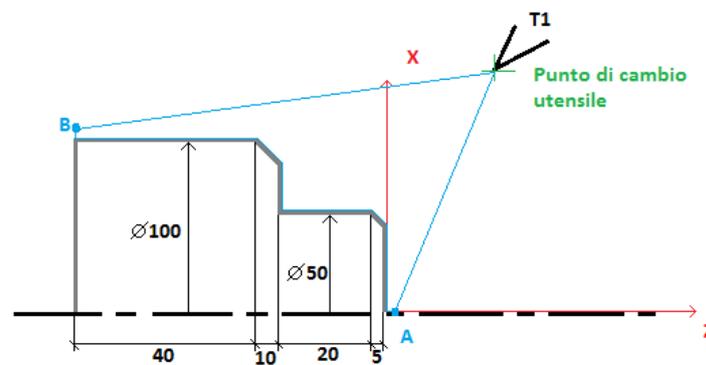


Figura 16. Esempio lavorazione CNC, identificazione assi di riferimento, geometria ed entità della lavorazione da effettuare.

La coordinata *X*, nella programmazione, identifica il valore dei diametri, la *Z*, invece, il valore della lunghezza assiale.

Per eseguire la contornatura con l'utensile *T1* ci si deve avvicinare prima all'origine degli assi, fino ad una distanza di sicurezza, altrimenti si avrebbe un urto con il pezzo e conseguentemente il danneggiamento di utensile e/o del componente da lavorare. Una distanza pari a 2 mm rispetto all'origine lungo la direzione dell'asse *z* potrebbe risultare accettabile. Tale posizione è identificata nell'immagine dalla lettera *A*.

Dopo aver realizzato il profilo, poi, ci si deve allontanare dal pezzo. L'esecuzione dei movimenti di allontanamento e appostamento, quindi delle relative fasi, si effettua alla massima velocità di traslazione della tavola, detta velocità di rapido.

Per quanto riguarda il cambio utensile, invece, prima di effettuarlo ci si sposta, nell'esempio considerato, nel punto di coordinate *X200* e *Z100*, ad una distanza sufficiente dal componente in lavorazione.

Il programma *ISO*, munito di commenti per favorirne la comprensione, per lavorazione sopra descritta risulta:

- ***N10 T01 M06***
T1: identifica l'utensile da utilizzare, situato nella posizione *1* del magazzino.
M6: identifica l'istruzione di cambio utensile.
- ***N20 F0.10***
Riguarda la definizione dei parametri di processo. In questo caso si è impostata una velocità di avanzamento pari a *0,1 mm/giro*.
- ***N30 S100***
Riguarda la definizione dei parametri di processo. In questo caso si è impostata una velocità di taglio pari a *100 m/min*.
- ***N40 M03***
M3: identifica l'istruzione di avvio mandrino con rotazione antioraria.
- ***N50 G00***
G0: identifica il settaggio della velocità di rapido della macchina utensile.
- ***N60 X0 Z2***
Riguarda la coordinata da raggiungere. Nel caso in esame, un collocamento a *2 mm* dall'origine degli assi imposto.
- ***N70 M08***
M8: identifica l'istruzione di apertura del circuito del lubrorefrigerante.
- ***N80 G01***
G1: identifica una interpolazione lineare tra due punti (per l'esecuzione della quale, viene seguita una traiettoria rettilinea) con velocità di avanzamento prima definita dall'istruzione *F* e velocità di taglio prima definita dal comando *S*.
- ***N90 Z0***
Nel caso in cui una delle due coordinate risulta omessa, vuol dire che questa non varia rispetto alla definizione precedente.
- ***N100 X40***
- ***N110 X50 Z-5***
- ***N120 Z-25***
- ***N130 X80***
- ***N140 X100 Z-35***
- ***N150 Z-75***
- ***N160 X102***
Prima di eseguire l'allontanamento dal pezzo alla velocità di rapido, ci si stacca dal componente, nel caso in esame in direzione radiale, di una quantità sufficiente ad evitare un possibile danneggiamento della lavorazione appena eseguita.
- ***N170 M09***
M9: identifica l'istruzione di chiusura del circuito del lubrorefrigerante.
- ***N180 G0 X200 Z100***
- ***N190 M05***
M5: identifica l'istruzione di arresto mandrino;
- ***N200 M30***

M30: identifica l'istruzione di fine programma.

Per l'esecuzione delle prove si è effettuata la variazione, all'interno del programma, dei valori associati alle funzioni relative ai parametri di taglio (F ed S) in relazione al piano degli esperimenti stilato, lasciando invariate le restanti parti.

3. Usura degli utensili da taglio

L'usura degli utensili da taglio, dovuta all'interazione del materiale dell'utensile con quello in lavorazione, è un fenomeno molto importante, in quanto determina la variazione delle caratteristiche geometriche del tagliente, a causa delle sollecitazioni meccaniche, chimiche e termiche subite durante la lavorazione, portando l'utensile ad una condizione tale per cui non è più in grado di soddisfare la qualità richiesta connessa alla lavorazione.

Vi sono due macro-tipi di fenomenologie di usura, derivante da:

- Danneggiamento istantaneo, come ad esempio rottura fragile e scheggiatura.
- Danneggiamento progressivo dell'utensile.

Si analizzano principalmente i fenomeni legati al degrado progressivo dell'utensile dovuto all'usura, poiché oltre ad un fattore relativo alla qualità della lavorazione, può portare alla rottura dello stesso, rischiando di danneggiare anche la macchina, oltre che il solo pezzo.

Quindi, il concetto di usura è legato alla vita dell'utensile, che in base alle sue caratteristiche costruttive (materiale, geometria, ecc.), al materiale lavorato ed al tipo di lavorazione, sarà caratterizzato quindi da un intervallo temporale ben definito, oltre il quale deve essere poi sostituito. Da ciò deriva anche un rilevante collegamento tra usura e costo della lavorazione.

3.1. Meccanismi di usura:

Sempre relativamente al danneggiamento degli utensili nelle lavorazioni ad asportazione di truciolo, si può distinguere fra:

1. Usura abrasiva: che si può manifestare sia su faccia che su dorso (o fianco) a causa delle alte temperature sviluppate durante il taglio. Tali condizioni portano alla formazione di ossidi, molto duri, che si possono addensare sulla faccia dell'utensile, in prossimità del tagliente, portando alla formazione del tagliente di riporto, o che aderiscono al truciolo portando all'abrasione della faccia dell'utensile, a causa dello strisciamento relativo e delle alte pressioni generate in tale zona. Sul dorso invece, si può verificare uno strisciamento dello stesso con la superficie lavorata a causa del ritorno elastico che si manifesta in corrispondenza di una zona di deformazione terziaria.
2. Usura adesiva: che è caratteristica della faccia dell'utensile, zona di deformazione secondaria, dove, in prossimità del tagliente, l'azione di elevati carichi ad alte temperature, comporta la nascita di fenomeni di saldatura allo stato solido. In prossimità della superficie di contatto pezzo-utensile c'è una continua formazione e successiva rottura di microsaldature, tra materiale in lavorazione e l'utensile. Questo continuo fenomeno di giunzione-distacco di materiali nella zona di taglio, in corrispondenza delle asperità dovute alla naturale rugosità delle superfici, porta a micro-asportazioni di materiale, che si possono verificare anche sulla faccia

dell'utensile e che, sommandosi nel tempo, contribuiscono a deteriorare la geometria stessa. È un meccanismo prevalente nella lavorazione di materiali duttili, che hanno maggiore propensione a generare giunzioni allo stato solido.

3. Usura per diffusione: che è dovuta alla mutua solubilità degli elementi costitutivi dei materiali a contatto, i quali fanno migrare gli atomi da una superficie all'altra, ed è tanto maggiore quanto più elevata l'affinità chimica tra il materiale in lavorazione e quello dell'utensile. Tale forma di usura è favorita dalle alte temperature che si sviluppano durante il taglio.

3.2. Zone di usura e durata del tagliente

L'usura di un utensile da taglio genera una deviazione geometrica del tagliente e delle zone in prossimità di esso, alterando le condizioni di taglio.

Gli effetti dell'usura si possono collegare a due modificazioni geometriche macroscopiche:

- Il labbro di usura
- Il cratere di usura

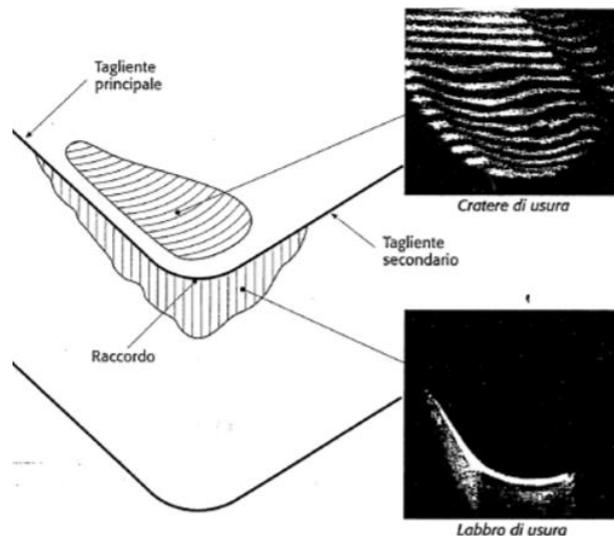


Figura 17. Identificazione delle forme più comuni di usura.

- Il labbro di usura, che dipende principalmente dal fenomeno di abrasione, si può definire come la distanza tra profilo iniziale della faccia dell'utensile ed il punto in cui si rileva il cambio di direzione del profilo del dorso (V_b), interessando quindi: fianco principale, raggio di raccordo tra i taglienti e fianco secondario. Il tagliente cambia struttura e, di conseguenza, la qualità della superficie lavorata peggiora.

Aumentando l'entità, aumenta la forza di taglio necessaria al processo poiché l'inserito diventa sempre meno affilato, a causa dello sviluppo dell'usura.

Quando si verificano le cause sopra descritte si dovrebbero sostituire o rafilare gli utensili. In particolare, se:

- La finitura superficiale del pezzo inizia a deteriorarsi
- Le forze di taglio aumentano significativamente
- Le temperature aumentano significativamente

Vb_{max} in differenti condizioni di taglio è un dato tabellare. Il valore di Vb deve essere inferiore al tabellato per avere:

- Migliore accuratezza dimensionale
- Migliore qualità superficiale

Per quanto riguarda la velocità di taglio raccomandata, essa dipende da: pezzo, operazione svolta, considerazioni sull'alta produttività dovute all'uso di moderne CNC.

Aumentando la velocità di taglio, la vita dell'utensile si riduce rapidamente. Riducendola invece, se di molto, la vita dell'utensile si allunga, ma il rateo al quale il materiale è rimosso si riduce anche. Quindi, una velocità di taglio ottima, include parametri differenti.

- Il cratere di usura: che dipende principalmente dall'adesione e dalla diffusione, e si manifesta principalmente in prossimità del tagliente come una depressione sulla faccia (o petto) dell'utensile. A livello di entità, si valuta come profondità. La sua formazione è causata dal truciolo che crea una usura abrasiva sulla superficie dell'inserto a contatto con esso, variando la geometria di contatto all'interfaccia utensile-truciolo. I fattori più significativi che influenzano tale tipo di usura sono:

- La temperatura all'interfaccia utensile-truciolo.
- L'affinità chimica tra il materiale dell'utensile e quello del pezzo.
- Anche i fattori che influenzano l'usura sul fianco.

Il fenomeno di diffusione chimica tra truciolo e tagliente, dovuta alle alte temperature sulla superficie, è dato dal moto degli atomi attraverso l'interfaccia tra i due. Esso aumenta all'aumentare della temperatura, così come il cratere di usura.

La formazione di cavità si ha sulla parte del tagliente dove sono localizzate le temperature più alte, sempre in relazione al contatto col truciolo.

L'avanzamento della macchina discrimina la distanza dal tagliente dalla quale si ha l'inizio del cratere. Se questo aumenta, aumenta la distanza del cratere dalla superficie.

Per rallentare efficacemente il processo di diffusione, e di conseguenza anche quello di formazione del cratere di usura, si effettua l'applicazione di rivestimenti protettivi agli utensili.

Rivestimenti tipici:

- Nitruro di titanio
- Carburo di titanio
- Carbonitruro di titanio
- Ossido di alluminio

La posizione del valore massimo del cratere di usura KT coincide con la posizione della massima temperatura all'interfaccia pezzo-utensile. Quindi, la posizione del cratere di usura sul pezzo coincide con quella dove è presente una decolorazione, indicante il raggiungimento di alte temperature.

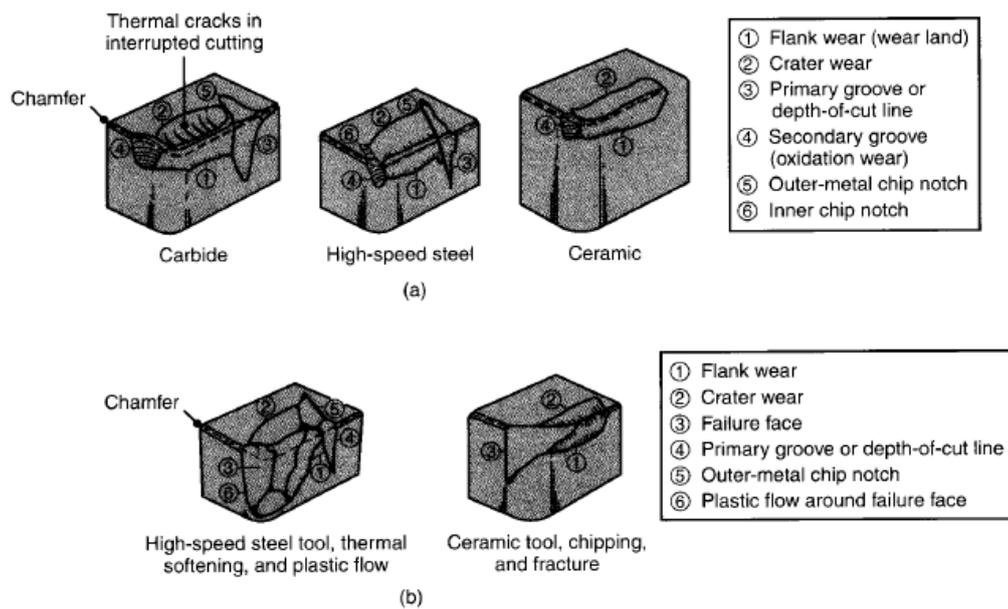


Figura 18. Formazione dei meccanismi di usura nei diversi materiali.

Per la rappresentazione quantitativa di queste due forme di usura si devono rilevare almeno tre grandezze:

- Il valore VB della larghezza del labbro di usura sul fianco principale, misurato dallo spigolo tagliente originale;
- La profondità KT del cratere sulla faccia dell'utensile;

- La distanza KM del punto medio del cratere, misurata dallo spigolo tagliente originale.

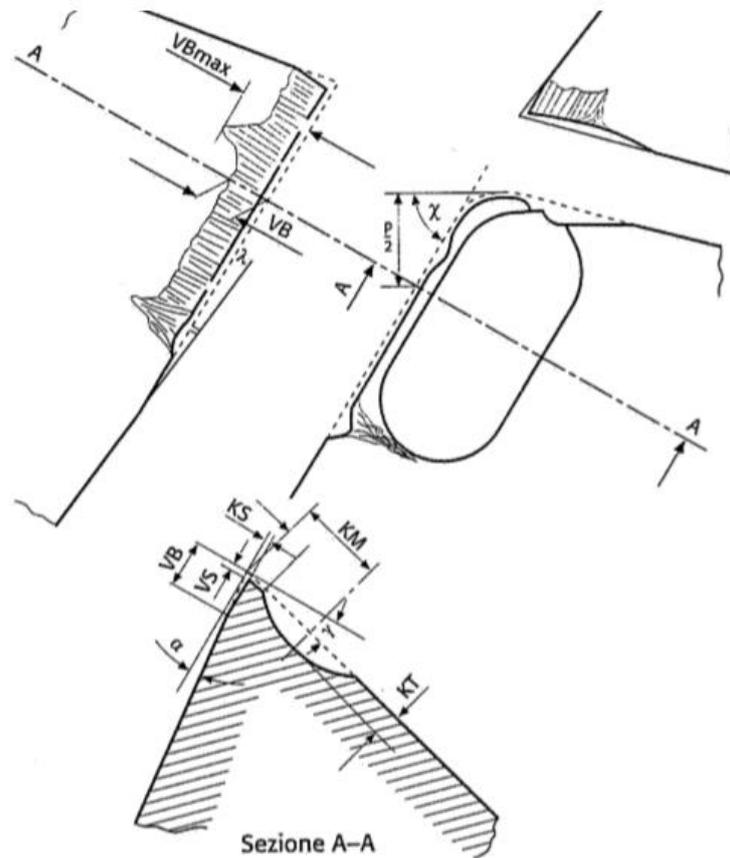


Figura 19. Grandezze da utilizzare per la rappresentazione delle forme di usura considerate.

Si osservi che i segmenti VS e KS esprimono l'arretramento dello spigolo tagliente originario dovuto all'usura, rispettivamente, sul fianco e sul petto dell'utensile.

Per quantificare la durata dell'utensile si devono fissare dei criteri di usura, a partire da parametri facilmente misurabili:

1. In funzione del massimo grado di usura ammissibile sul fianco dell'utensile, la larghezza del labbro di usura $VB = 1 \text{ mm}$ è considerata, in generale, come limite superiore. Al di sopra di tale valore, anche in caso di minima usura del cratere, si hanno: distacchi di materiale dall'utensile, aumento eccessivo di rugosità superficiale e forze di taglio.
2. In funzione del massimo grado di usura ammissibile sul petto dell'utensile, il criterio utilizzato per il cratere di usura è, di solito, il rapporto KT/KM . Per gli utensili in carburi il limite superiore di tale rapporto è di $0,1$. Al disopra di tale valore si hanno

distacchi di materiale dall'utensile, rendendolo inutilizzabile e aumentando i rischi di rottura, in seguito all'indebolimento della sezione resistente.

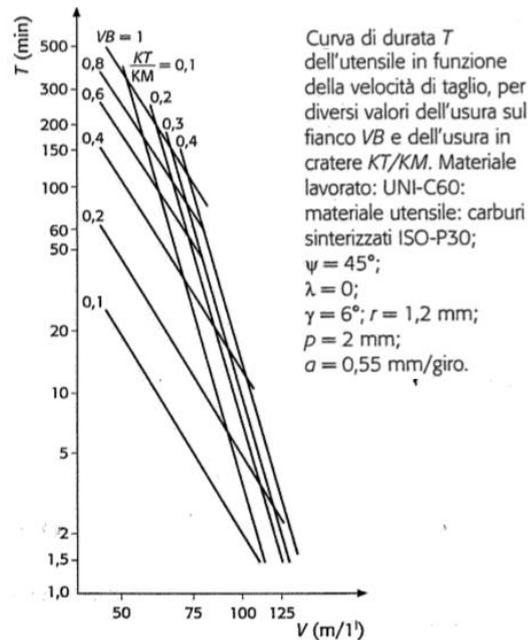


Figura 20. Andamento della durata dell'utensile in funzione della velocità di taglio, per diversi valori dell'usura sul fianco VB e dell'usura in cratere KT/KM .

Un ulteriore metodo per la valutazione della durata di un utensile è dato dalla relazione di Taylor, tramite la quale, considerando fissi tutti gli altri parametri di taglio, è possibile determinare una relazione tra durata e velocità di taglio.

Tale relazione venne ottenuta sperimentalmente attraverso una serie di prove di durata. Quindi, lavorando il materiale con diverse velocità di taglio, determinando per ciascun utensile la durata T in minuti.

$$v \cdot T^n = C$$

- v : velocità di taglio, espressa in m/min
- T : durata del tagliente dell'utensile, espressa in minuti;
- n : coefficiente di durata del tagliente, che è una costante dipendente principalmente dalla coppia di materiali utensile-pezzo.
- C : costante dipendente dagli altri parametri di taglio e pari alla velocità di taglio che, per valori prefissati degli altri parametri, consente una durata del tagliente pari ad un minuto (infatti per $T=1 \rightarrow C=v$)

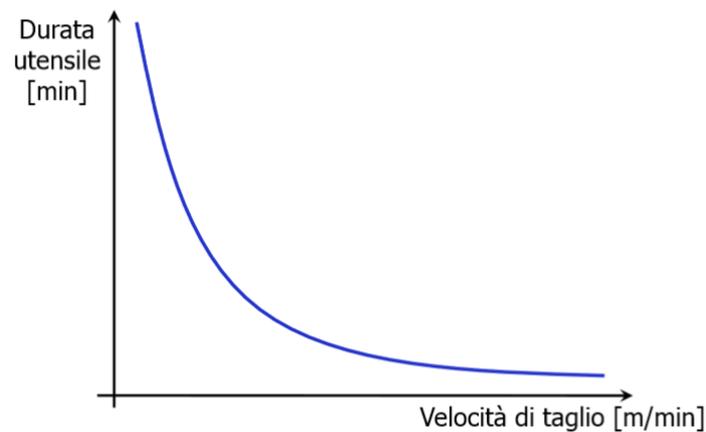


Figura 21. Andamento della durata dell'utensile in funzione della velocità di taglio.

3.3. Altri meccanismi di usura

Usura sul naso: che è l'arrotondamento del tagliente dell'utensile dovuto ad effetti termici e meccanici. Arrotondandosi, l'utensile, influenza la formazione di truciolo e causa strisciamento dell'utensile sul pezzo, facendo aumentare la sua temperatura ed inducendo possibili stress residui sulla superficie lavorata, con conseguente deformazione plastica. Un fenomeno correlato ad esso è l'arrotondamento di spigolo.

Per gli utensili in acciai super rapidi, l'aumento della temperatura è particolarmente importante.

Gli intagli: attribuibili al fatto che nella regione in cui sono presenti, il truciolo non è più in contatto con l'utensile. Questo confine, noto come linea della profondità di taglio con profondità V_n , oscilla a causa di variazioni nell'operazione di taglio.

In più, essendo la regione in contatto con la superficie generata durante il taglio precedente, potendo così sviluppare un sottile strato incrudito durante la lavorazione, si ha che questo contribuirà alla formazione di tale cratere.

Se sufficientemente profondo, l'intaglio può portare al danneggiamento per scheggiatura della punta, con distacco di frammenti, dell'utensile a causa della sezione trasversale ridotta, aumentando la sensibilità all'intaglio del materiale dell'utensile stesso. Anche gli strati di ossido sulla superficie del pezzo possono anche contribuire a tale tipo di usura perché essi sono duri ed abrasivi. La profondità di taglio quindi deve essere maggiore dello spessore di ossido o di quello incrudito.

Questo fenomeno di solito si verifica su materiali fragili come i ceramici. I frammenti distaccati possono essere molto piccoli (*microchipping*) o molto grandi (*macrochipping*).

3.4. Usura su inserti tondi

Le modalità di usura più comunemente osservate sono: scheggiature del bordo tagliente, usura sul fianco, intaglio e sfaldamento. L'usura sul fianco è un normale fenomeno di usura progressiva presente in tutti gli utensili da taglio. La grandezza di questa e la velocità con cui si sviluppa, sono i valori con cui dovrebbe essere giudicata la vita del tagliente. La condizione ideale sarebbe quella tale per cui sia l'intaglio, che l'usura sul fianco, si trovino alle dimensioni del massimo accettabile, cosa alquanto improbabile poiché un meccanismo si sviluppa, di solito, prima dell'altro. A livello quantitativo, l'usura ad intaglio non dovrebbe superare $1/3$ dello spessore dell'inserto. Essa è, molto spesso, il risultato di uno sviluppo di calore insufficiente nella zona di taglio. Questo può essere risolto aumentando la velocità, diminuendo l'avanzamento o mediante una combinazione di entrambi.

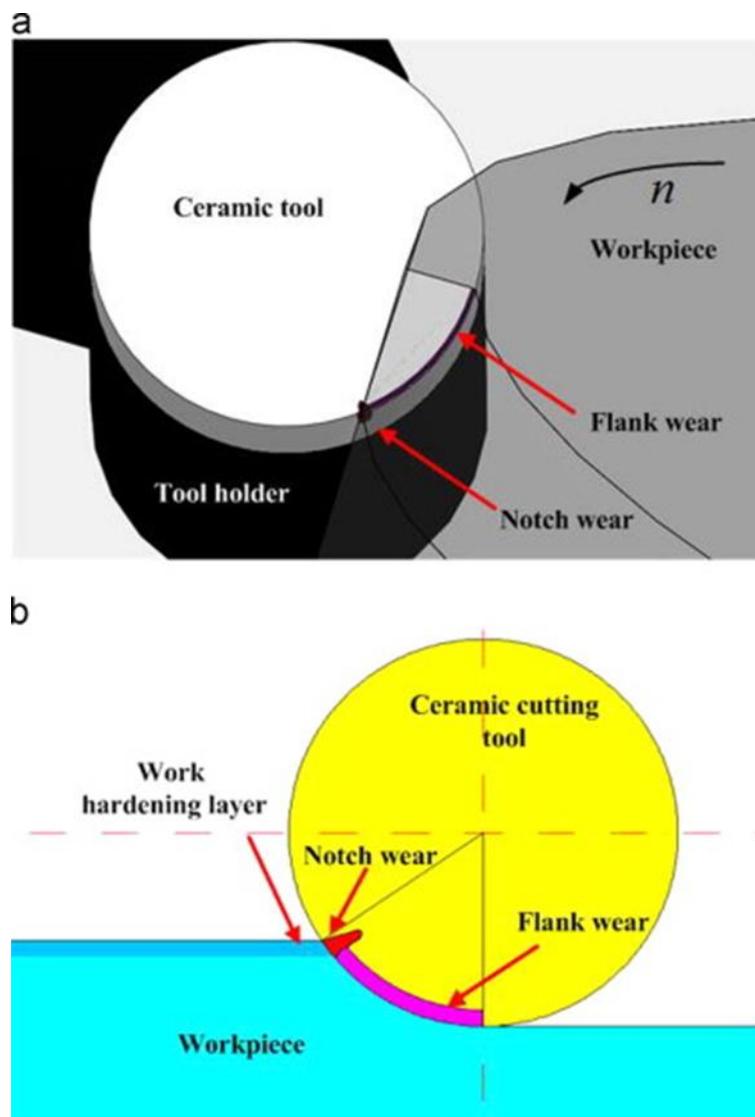


Figura 22. Manifestazione dei meccanismi di usura su di un inserto tondo.

4. Regressione lineare multipla

La regressione lineare multipla è una estensione della regressione lineare semplice, dove si utilizza una sola variabile indipendente o esplicativa X per prevedere il valore della variabile risposta o dipendente Y , al caso in cui si utilizzano due o più variabili per spiegare il comportamento della variabile risposta. In più, tra la variabile dipendente e quelle esplicative vi deve essere una relazione lineare.

Si considera il modello con p variabili indipendenti:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_{1i} + \beta_2 * X_{2i} + \beta_3 * X_{3i} + \dots + \beta_p * X_{pi} + \epsilon_i$$

Dove:

- β_0 è l'intercetta
- β_1 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_1 tenendo costanti le variabili X_2, X_3, \dots, X_p
- β_2 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_2 tenendo costanti le variabili X_1, X_3, \dots, X_p
- β_3 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_3 tenendo costanti le variabili X_1, X_2, \dots, X_p
- β_p è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_p tenendo costanti le variabili $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{p-1}$
- ϵ_i è l'errore in corrispondenza dell'osservazione i
- $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{pi}$ sono i valori assunti dalle variabili esplicative
- I vari β , sono anche detti coefficienti di regressione

Si considera il modello nel caso di due variabili indipendenti:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_{1i} + \beta_2 * X_{2i} + \epsilon_i$$

Dove:

- β_0 è l'intercetta
- β_1 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_1 tenendo costante la variabile X_2
- β_2 è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile X_2 tenendo costante la variabile X_1
- ϵ_i è l'errore in corrispondenza dell'osservazione i

Nel caso dell'equazione del modello di regressione lineare semplice, invece:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_i + \epsilon_i$$

Con β_1 pari alla variazione che la variabile Y subisce dopo una variazione unitaria di X .

Nella multipla, invece, β_1 è la variazione che la variabile Y subisce dopo una variazione unitaria di X_1 , tenendo costante l'altra, nonostante si debba tenere anche conto degli effetti della variabile X_2 . Proprio per questa ragione i singoli β sono anche noti come coefficienti netti di regressione.

Per stimare i parametri della popolazione ($\beta_0, \beta_1, \beta_2$) si utilizzano i coefficienti di regressione campionari (b_0, b_1, b_2), quindi l'equazione della regressione multipla con due variabili esplicative diviene:

$$Y_i = b_0 + b_1 * X_{1i} + b_2 * X_{2i}$$

Il valore di tali coefficienti si può calcolare con il metodo dei minimi quadrati, mediante l'ausilio di opportuni software statistici.

Il modello di regressione, così stimato, si può utilizzare per la previsione dei valori della variabile risposta Y , al variare delle variabili X , che potrebbero assumere anche valori non noti.

Coefficienti di determinazione

Dato che in un modello di regressione multipla si hanno almeno due variabili esplicative, si utilizza un coefficiente per rappresentare la proporzione di variabilità della Y spiegata da ciascuna delle variabili esplicative. Tale coefficiente è detto il coefficiente di determinazione, ed è dato dal rapporto tra la somma dei quadrati della regressione e la somma totale dei quadrati.

$$r_{Y,12}^2 = SQR/SQT$$

Dove:

- SQR è la somma dei quadrati della regressione
- SQT è la somma totale dei quadrati

Nonostante ciò, in caso di impiego di un modello di regressione multipla, occorre utilizzare un indice che tenga conto anche del numero di variabili esplicative incluse nel modello e dell'ampiezza del campione, ovvero l' r^2 corretto.

L'utilizzo di tale tipo di indice è necessario soprattutto quando si vogliono confrontare modelli di regressione che vorrebbero esprimere la variabilità della stessa variabile dipendente, tramite un numero differente di variabili esplicative. In questo caso, l' r^2 corretto è dato dalla seguente espressione:

$$r_{adj}^2 = 1 - [(1 - r_{Y,12...p}^2) * (n - 1)/(n - p - 1)]$$

Con p pari al numero delle variabili esplicative incluse nel modello.

Analisi dei residui

Tale analisi è utile per valutare l'adeguatezza del modello di regressione considerato ed impiegato per l'analisi dei dati. Si fa mediante l'analisi di alcuni grafici. In particolare, per un modello con due variabili esplicative, si hanno:

1. Il grafico dei residui rispetto ad Y_i , che permette di stabilire se i residui presentano un andamento o meno rispetto ai valori previsti dalla Y con una struttura riconoscibile. Esso si usa per provare la presenza di un legame non lineare tra almeno una delle variabili esplicative e quella dipendente, e/o la necessità di una trasformazione della variabile dipendente Y .

2. Il grafico dei residui rispetto ad X_{1i} .
3. Il grafico dei residui rispetto ad X_{2i} , che insieme al precedente riguardano le variabili esplicative. Nel caso in cui si abbia un andamento strutturato dei residui rispetto ad una delle due, si potrebbe avere un legame fra tale variabile e la Y , oppure la necessità di una trasformazione della variabile stessa.
4. Il grafico dei residui rispetto al tempo, che si utilizza per valutare la presenza di una struttura nei residui quando la raccolta dati avviene nel corso del tempo.

IL TEST PER LA VERIFICA DELLA SIGNIFICATIVITÀ DEL MODELLO DI REGRESSIONE LINEARE MULTIPLA

Dopo aver valutato l'adeguatezza del modello di regressione lineare multipla tramite l'analisi dei residui, si deve verificare la presenza o meno di una relazione significativa tra la variabile dipendente e l'insieme delle variabili esplicative.

Essendo in presenza di più di una variabile esplicativa, si devono specificare l'ipotesi nulla e quella alternativa come segue:

- $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$ (Non vi è una relazione lineare tra la variabile dipendente e le variabili esplicative.)
- H_1 : Almeno un $\beta_1 \neq 0$ (Vi è una relazione lineare tra la variabile dipendente e almeno una delle variabili esplicative.)

Questo problema di verifica di ipotesi si risolve utilizzando il test F , come per il caso della regressione lineare semplice.

Il test di F sull'intero modello nel modello di regressione multipla

La statistica F si calcola tramite il rapporto tra la media dei quadrati della regressione (MQR) e la media dei quadrati dell'errore (MQE):

$$F = MQR/MQE$$

Dove:

- P è il numero delle variabili esplicative nel modello di regressione
- F è il test di statistica F , avente una distribuzione F con p e $n-p-1$ gradi di libertà

Si ha che la regola decisionale in questo caso è:

Rifiutare H_0 se $F > F_U$

Con F_U pari al valore critico sulla coda di destra di una distribuzione F con p e $n - p - 1$ gradi di libertà; altrimenti accettare H_0 .

Fonte	GDL	Somma dei quadrati	Media dei quadrati (varianza)	F
Regressione	p	SQR	$MQR = \frac{SQR}{p}$	$F = \frac{MQR}{MQE}$
Residuo	$n - p - 1$	SQE	$MQE = \frac{SQE}{n - p - 1}$	
Totale		$n - 1$	STQ	

Figura 23. Tabella ANOVA per il test per la verifica della significatività dell'insieme dei coefficienti di regressione nel modello di regressione multipla con $p=2$ variabili esplicative.

INFERENZA SUI COEFFICIENTI DI REGRESSIONE DELLA POPOLAZIONE

Test di ipotesi t: è un test che si usa per verificare la significatività della relazione tra X e Y , tramite la costruzione di un intervallo di confidenza per la stima dell'inclinazione stessa.

Per la verifica dell'ipotesi $\beta_1 = 0$ nel modello di regressione semplice si utilizza la seguente equazione:

$$t = b_1 / S_{b_1}$$

Invece per la verifica delle ipotesi sull'inclinazione nel modello di regressione multipla:

$$t = b_k / S_{b_k}$$

Dove:

- p = è il numero di variabili esplicative
- b_k = è l'inclinazione di Y rispetto alla variabile k , tenendo costanti le altre variabili
- S_{b_k} = è l'errore standard del coefficiente di regressione b_k
- t = è la statistica test con distribuzione t con $n-p-1$ gradi di libertà

Verificare la significatività di un particolare coefficiente di regressione vuol dire verificare la significatività dell'inserimento della variabile corrispondente nel modello di regressione, note le variabili già presenti. Pertanto, il test t su di un coefficiente di regressione corrisponde al test sul contributo della variabile esplicativa corrispondente.

La stima per intervalli di confidenza

Invece di valutare la significatività di uno dei coefficienti di regressione, si può essere interessati a farne una stima. Per un modello di regressione multipla, l'espressione dell'intervallo di confidenza per il generico coefficiente di regressione β_k è la seguente:

$$b_k \pm t_{n-p-1} * S_{b_k}$$

LA VERIFICA DI IPOTESI SULLE PROPORZIONI NEL MODELLO DI REGRESSIONE MULTIPLA

Durante la costruzione di un modello di regressione multipla si intende inserire solo le variabili esplicative utili alla previsione della variabile dipendente. Se non utile, una variabile si dovrebbe eliminare dal modello, passando all'utilizzo di un modello con un numero minore di variabili.

Per valutare in modo alternativo il contributo di ciascuna variabile esplicativa si può utilizzare il criterio del test F parziale, che comporta il calcolo del contributo che ciascuna variabile esplicativa apporta alla somma dei quadrati, dopo aver incluso tutte le altre variabili esplicative nel modello. Se il modello risulta significativamente migliorato, allora la nuova variabile è inclusa nel modello stesso.

In presenza di più di una variabile esplicativa, il contributo di ciascuna di essa si può valutare tramite la somma dei quadrati della regressione per un modello comprendente tutte le variabili esplicative tranne quella presa in considerazione, SQR (tutte le variabili tranne la k -esima). Quindi il contributo della variabile k , supponendo tutte le altre variabili note nel modello, si valuta tramite la seguente quantità:

$$\begin{aligned} SQR(X_k | \text{tutte le variabili tranne la } k - \text{esima}) \\ = SQR(\text{tutte le variabili inclusa la } k - \text{esima}) \\ - SQR(\text{tutte le variabili esclusa la } k - \text{esima}) \end{aligned}$$

In presenza di due variabili esplicative il contributo di ciascuna delle variabili esplicative si può determinare con le seguenti quantità:

- Il contributo della variabile X_1 quando X_2 è inclusa nel modello

$$SQR(X_1 | X_2) = SQR(X_1 e X_2) - SQR(X_2)$$

- Il contributo della variabile X_2 quando X_1 è inclusa nel modello

$$SQR(X_2 | X_1) = SQR(X_1 e X_2) - SQR(X_1)$$

I termini $SQR(X_2)$ e $SQR(X_1)$ rappresentano, rispettivamente, la somma dei quadrati della regressione per il modello avente come sola variabile esplicativa X_2 e la somma dei quadrati della regressione per il modello avente come sola variabile esplicativa X_1 .

Per stabilire se X_1 migliora in maniera significativa il modello, in cui X_2 sia già stata inclusa, si può suddividere la somma dei quadrati della regressione in due componenti. Considerando l'ipotesi nulla e l'ipotesi alternativa per verificare la significatività del contributo di X_1 al modello, rispettivamente:

- H_0 : La variabile X_1 non migliora in maniera significativa il modello in cui la variabile X_2 sia stata inclusa.
- H_1 : La variabile X_1 migliora in maniera significativa il modello in cui la variabile X_2 sia stata inclusa.

Si utilizza il test F parziale, per la valutazione del contributo di una variabile indipendente, che è dato dalla seguente espressione:

$$F = (SQR(X_k | tutte le variabili eccetto k) / MQE)$$

Se il valore osservato della statistica F è maggiore del valore critico, si decide di rifiutare l'ipotesi H_0 e si conclude che l'inserimento della variabile X_1 migliora in maniera significativa un modello di regressione già contenente la variabile X_2 .

In maniera del tutto analoga a quanto fatto per la variabile X_1 , si effettuano i ragionamenti sulla variabile X_2 .

Dopo aver verificato la significatività del contributo di ciascuna variabile, si possono fare considerazioni sul fatto che, se entrambe le variabili migliorano significativamente il modello, vi dovrebbero essere incluse entrambe.

Inoltre, è possibile individuare una relazione tra i valori della statistica test t , per valutare la significatività dei coefficienti corrispondenti alle variabili esplicative X_1 e X_2 , e quelli della statistica test F , per valutare il contributo al modello di regressione delle variabili esplicative X_1 e X_2 , tramite la seguente relazione generale tra t e F :

$$t_v^2 = F_{1,v}$$

Con v pari al numero dei gradi di libertà.

Il coefficiente di determinazione parziale

Tale coefficiente misura la proporzione della variabilità della variabile dipendente Y , spiegata da ciascuna variabile esplicative X_i , mantenendo costanti le altre variabili esplicative. In un modello di regressione con due variabili esplicative si hanno le seguenti espressioni:

$$r_{Y1.2}^2 = (SQR(X_1 | X_2)) / (SQT - SQR(X_1 e X_2) + SQR(X_1 | X_2))$$

$$r_{Y2.1}^2 = (SQR(X_2 | X_1)) / (SQT - SQR(X_1 e X_2) + SQR(X_2 | X_1))$$

Dove:

- $SQR(X_1 | X_2)$ è la parte della somma dei quadrati della regressione dovuta al contributo di X_1 quando X_2 è già inclusa nel modello
- SQT è la somma totale dei quadrati
- $SQR(X_2 | X_1)$ è la parte della somma dei quadrati della regressione dovuta al contributo di X_2 quando X_1 è già inclusa nel modello

In un modello con p variabili esplicative, per la k -esima variabile si avrà:

$$r_{Yk.(tutte le variabili tranne la k-esima)}^2 = (SQR(X_k | tutte le variabili tranne la k-esima)) / (SQT - SQR(tutte le variabili compresa la k-esima) + SQR(X_k | tutte le variabili tranne la k-esima))$$

5. Controllo statistico di processo e carte di controllo

Il prodotto è il risultato di un processo produttivo. Per soddisfare le esigenze dei consumatori deve essere stabile e ripetibile. Per avere ciò la variabilità del valore nominale specifico del prodotto deve essere la più bassa possibile.

L'obiettivo del controllo statistico di un processo produttivo è raggiungerne la stabilità, migliorandone la produttività attraverso la riduzione della variabilità.

Uno degli strumenti per fare ciò sono le carte di controllo.

In ogni processo è presente sempre una certa fonte di variabilità. Se questa è provocata soltanto da fattori casuali, tale processo si dice sotto controllo.

Altre fonti di variabilità influenzanti la qualità dei prodotti possono essere solo occasionali. In questo caso, se non riconducibili a fattori casuali, vengono detti fattori specifici.

Un processo che funziona in presenza di questi fattori viene detto fuori controllo.

L'obiettivo del controllo statistico è l'individuazione, in maniera più veloce possibile, del verificarsi di fattori specifici, poiché più velocemente possono essere attivate azioni correttive per ridurre la produzione di pezzi di qualità non accettabile.

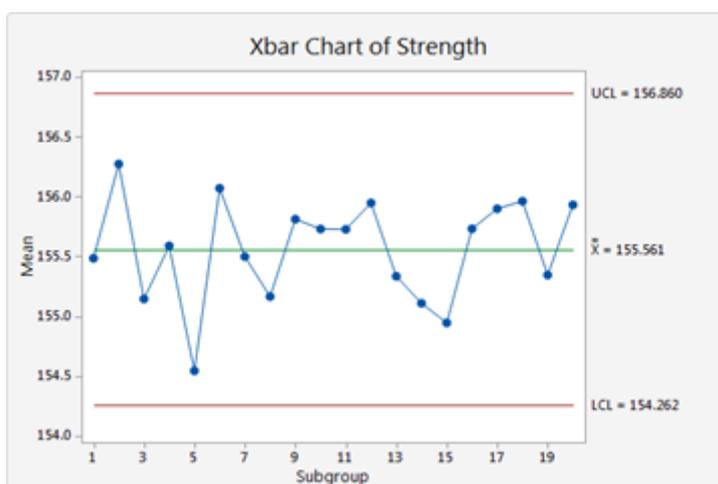


Figura 24. Esempio carta di controllo.

Dato l'esempio di carta di controllo, la linea centrale rappresenta il valor medio della qualità che di solito corrisponde al valore desiderato, se il processo è detto sotto controllo. Oltre questa, sono presenti altre due linee orizzontali rispettivamente il limite di controllo superiore *UCL* (*Upper Control Limit*) ed il limite di controllo inferiore *LCL* (*Lower Control Limit*). La scelta di tali limiti è effettuata in maniera tale da far ricadere i campioni tra i due limiti se il processo in controllo.

Se si hanno punti al di fuori di esse il processo è definito fuori controllo e saranno necessarie azioni correttive, o indagini per individuare ed eliminare le cause scatenanti di tali fattori

specifici. Oppure, nonostante si abbiano tutti i punti nei limiti di controllo, si può avere un processo fuori controllo, quindi per avere un processo sotto controllo occorre avere un andamento casuale dei punti. Tali differenze possono essere riscontrate in differenti modi, ad esempio si potrebbe avere lo spostamento della media ad un punto differente rispetto a quello precedente, uno shift, oppure si potrebbe verificare uno spostamento improvviso ed un ritorno al suo valore nominale, o ancora una deriva dal valore della media.

I limiti di controllo utilizzati di solito sono detti limiti a 3σ , poiché rappresenta lo spostamento in addizione ed in sottrazione di 3 volte la quantità della deviazione standard, rispetto al valor medio.

L'ampiezza dei limiti di controllo è inversamente proporzionale alla dimensione del campione n . Fissato un certo multiplo di σ , ponendo le relazioni del generico calcolo dei limiti di controllo, si possono scrivere le seguenti formule con L pari alla distanza dei limiti di controllo della linea centrale.

$$\begin{aligned}UCL &= \mu_w + L * \sigma_w \\CL &= \mu_w \\LCL &= \mu_w - L * \sigma_w\end{aligned}$$

Tali carte di controllo sono dette di *Shewhart*. Generalmente, l'obiettivo della carta di controllo è migliorare il processo. Questo perché, di solito, la maggior parte dei processi non opera in condizioni di controllo, quindi occorre identificare la presenza di fattori specifici. Dopo aver fatto ciò, bisogna intervenire per correggerli. Oppure, le carte di controllo possono essere utilizzate come strumento di stima, tramite le quali valutare alcuni parametri di processo come, ad esempio media, deviazione standard, e quantità di pezzi non conformi. Tramite queste si può valutare anche la capacità del processo di riprodurre pezzi accettabili, nota anche come *capability*.

Vi sono differenti utilizzi delle carte di controllo, in base alla caratteristica della variabile oggetto di studio. Se questa varia su una scala continua di valori, si dice variabile, quindi descrivibile mediante misure di centralità e variabilità mediante le carte di controllo per variabili.

Ad esempio, la carta per la media per controllare la centralità del processo e le carte su range campionario o sulla deviazione standard campionaria per controllarne la variabilità. Inoltre, vi sono anche le carte di controllo per attributi, tramite le quali viene valutata la conformità delle unità prodotta in base al soddisfacimento di determinati attributi in base al numero di difetti presenti.

Ragioni di successo scatenanti l'applicazione delle carte di controllo:

1. perché sono una tecnica per migliorare la produttività
2. sono efficaci per identificare pezzi difettosi
3. evitano inutili aggiustamenti del processo produttivo

4. forniscono informazioni diagnostiche, in base all'andamento dei punti
5. forniscono informazioni sulla capacità del processo e sulla sua stabilità nel tempo

5.1. Limiti di controllo

I sopracitati limiti a 3σ sono detti operativi. Si possono aggiungere a questi anche limiti interni, a 2σ , detti limiti di sorveglianza *UWL (Upper Warning Limit)*, *LWL (Lower Warning Limit)*. Il loro utilizzo può contribuire all'aumento della sensibilità della carta di controllo, segnalando in maniera più celere la presenza di uno spostamento del processo, ma allo stesso tempo potrebbero creare confusioni, dato che, se presenti, si vanno ad aggiungere ad i predefiniti 3σ .

Aumentando le dimensioni del campione anche, aumenta l'individuazione di piccoli spostamenti o irregolarità del processo.

I sottogruppi razionali sono quei campioni scelti in maniera tale che vi sia la presenza di fattori specifici.

In essi viene massimizzata la probabilità di osservare differenze tra i campioni, mentre viene minimizzata la probabilità di osservare differenze tra le unità formanti il campione. In più, se utilizzate per il monitoraggio dei processi produttivi continui, un vantaggio può essere costituito dalla sequenzialità della produzione.

La costruzione dei sottogruppi razionali può avvenire tramite due approcci:

- costruire i campioni in modo che questi contengano unità prodotte nello stesso, o quasi, istante temporale, questo per individuare scostamenti sistematici della produzione, poiché il suo obiettivo è minimizzare la probabilità di avere variabilità legata a fattori specifici nel campione e massimizzare la probabilità di avere alta variabilità tra i campioni nel caso di presenza di errori sistematici.
- costruire i campioni in maniera tale che siano rappresentativi dalla produzione trascorsa dall'ultimo controllo effettuato. In questo caso ogni sottogruppo è un campione casuale della produzione ottenuta e l'intervallo di campionamento.

In ogni caso, prima di scegliere i campioni bisogna fare una attenta analisi del processo per ottenere dalla carta di controllo il maggior numero di informazioni possibili.

5.2. Carte di controllo per variabili

Si utilizzano per il controllo di caratteristiche qualitative misurate su scala numerica, tra quelle più utilizzate vi sono quelle per monitorare la media e la variabilità delle variabili di interesse. Oltre queste vi sono anche quelle per misure singole.

Se la media e la deviazione standard sono sotto controllo in corrispondenza del loro valore nominale la maggior parte dell'output del processo cade nei limiti di specifica.

Invece se la media si sposta ad un valore superiore, si osserverà un maggior numero di parti non conformi, che si avrà anche se la deviazione standard si sposta ad un valore maggiore del nominale, questo tenendo rispettivamente l'altro termine, media o deviazione standard, pari al valore nominale.

Data una caratteristica x distribuita secondo una legge variabile, con media e deviazione standard σ note. Se si ha un campione di dimensioni n , il valore medio è pari a:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

I limiti di controllo posti su questo andamento permettono di costruire una carta di controllo per la media campionaria, se un valore cade al di fuori di questi, la media del processo non è più in controllo.

I valori di media e deviazione standard devono essere stimati su un determinato numero di campioni preliminari, rilevati in un periodo tale per cui il processo sia sotto controllo.

Di solito, il numero di campioni è piccolo, tra 4 e 6, quindi per giustificare questo fatto si utilizzano i sottogruppi razionali.

Date le medie di ciascun campione, si può calcolare la media degli m campioni:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m}$$

Per la costruzione dei limiti di controllo bisogna calcolare anche la deviazione standard σ utilizzando la deviazione standard o il range degli m campioni. Il range del campione è la differenza tra la più grande e la più piccola determinazione campionaria:

$$R = x_{max} - x_{min}$$

Dati i range di ciascun campione, lo stimatore del range del processo per la costruzione dell'*Xbar-R chart* è il range medio:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$$

Di seguito sono rappresentati i limiti di controllo per la carta X e la carta R, dove i valori delle costanti sono tabulati in base al numero dei campioni n .

Limiti di controllo per la carta \bar{x}

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{x} + A_2 * \bar{R} \\ CL &= \bar{x} \\ LCL &= \bar{x} - A_2 * \bar{R} \end{aligned}$$

Limiti di controllo per la carta R

$$\begin{aligned}UCL &= D_4 * \bar{R} \\CL &= \bar{R} \\LCL &= D_3 * \bar{R}\end{aligned}$$

Con le formule sopra descritte, i limiti di controllo ricavati si dicono di prova. Questi servono per verificare se il processo è sotto controllo con gli n campioni iniziali, se si verifica tale situazione, i limiti calcolati si possono dire attendibili. Se invece, è presente qualche punto fuori dai limiti di controllo, il processo si dice fuori controllo e bisogna analizzarlo per l'individuazione di un fattore specifico. Se ciò avviene, bisogna scartare il punto e ricalcolare i limiti di controllo sui punti rimanenti, verificando dopo se nei nuovi limiti di controllo ricadono i punti rimasti.

Per costruire le carte $X-R$ conviene iniziare con la carta R , perché i limiti di controllo della carta X dipendono dalla variabilità del processo e, finché la variabilità non è sotto controllo, i limiti costruiti con le relazioni scritte prima non sono molto significativi.

Dopo aver individuato che la variabilità del processo della carta R è sotto controllo, si può passare alla costruzione della carta X . Se, anche in questo caso, non sono presenti punti fuori controllo, si può dire che i limiti costruiti possono essere utilizzati per il controllo del processo. Di solito i limiti del processo sono calcolati addizionando e sottraendo un valore pari a 3σ alla media. Se invece la carta R non è sotto controllo, si ricalcolano per la carta R eliminando i punti fuori controllo, di conseguenza poi anche nella carta X . Da ciò deriva individuazione dei limiti di controllo più stretti per entrambe le carte ed una nuova stima della deviazione standard.

Bisogna considerare che non vi è alcun legame tra i limiti di controllo delle carte $X-R$ ed i limiti della specifica del processo. Questo perché i limiti di controllo si individuano in base ai limiti naturali, i limiti di specifica, invece, sono indipendenti dal comportamento naturale del processo. Quindi si può dire che non esiste nessuna relazione matematica o statistica tra limiti di controllo e limiti di specifica.

La carta X monitora il livello medio di qualità del processo, quindi i campioni si dovrebbero scegliere in maniera tale da massimizzare la probabilità di osservare variazioni del valor medio, ad esempio 3 campioni.

Quindi la carta X misura la variabilità tra i campioni, ovvero la variabilità del processo nel tempo, la carta R , invece, misura la variabilità all'interno dei campioni stessi, ovvero la variabilità del processo in un dato istante.

La stima della deviazione standard per costruire i limiti di controllo, si ottiene calcolando la variabilità all'interno di ciascun campione, quindi se si utilizzano tutti i dati per calcolare la deviazione standard non è corretto perché in tal modo si combina l'effetto e la variabilità tra campioni e all'interno dei singoli campioni.

Quando sono noti i valori di media e deviazione standard della popolazione, questi si possono usare per la costruzione delle carte $X-R$.

Come già detto in precedenza, si può osservare una situazione di fuori controllo su di una carta quando i punti si dispongono in modo non casuale all'interno dei limiti di controllo. Questo fornisce informazioni diagnostiche sul processo che possono essere utilizzate per apportare modifiche e ridurre la variabilità.

Prima di valutare gli andamenti non casuali sulla carta X , occorre verificare che la carta R sia in controllo, perché nel caso in cui non lo fosse bisogna intervenire prima sulla carta R .

Degli andamenti non casuali si possono avere quelli ciclici, che sono dati dalla continua variazione ad esempio delle condizioni ambientali di funzionamento del processo sulla carta X , invece sulla R può essere dovuto ai programmi di manutenzione dei macchinari o all'affaticamento degli operatori.

Oppure un'altra situazione si può avere quando i punti cadono in prossimità dei limiti di controllo per la maggior parte, coi restanti che si distribuiscono intorno al limite centrale.

Allo stesso tempo si può verificare lo spostamento del valor medio che può essere dovuto a diverse cause, ad esempio ad una deriva, tramite lo spostamento continuo in una direzione, o ad una stratificazione, che è la tendenza dei punti a creare gruppi intorno alla linea centrale. Nonostante ciò, bisogna sempre tenere in considerazione che le due carte $X-R$ devono essere valutate insieme.

Oltre la tipologia sopra descritta, che si utilizza per il monitoraggio di un processo con dimensione campionaria maggiore di 1, si possono avere anche carte di controllo per misure singole, che si hanno nel caso in cui una caratteristica venga misurata una sola volta per ogni unità prodotta. In questo caso, le due carte accorpate sono: la carta dei valori individuali e quella del range mobile calcolato tra due osservazioni successive, e definito dalla relazione seguente:

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}|$$

I limiti per tali carte di controllo, invece, sono espressi dalle seguenti relazioni:

$$UCL = \bar{x} + 3 * \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

$$CL = \bar{x}$$

$$LCL = \bar{x} - 3 * \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

A livello di osservazioni effettuabili su queste carte, esse sono simili, per quanto riguarda quella dei valori individuali, a quelle che effettuabili su quella delle medie, invece, quella del range mobile può essere utile per stabilire il componente da cui è avvenuta la variazione di processo, tenendo conto che si potrebbero osservare anche in questo caso andamenti regolari o ciclici.

6. Strumenti e dispositivi impiegati

6.1. Centro di lavoro

Il macchinario utilizzato per l'esecuzione delle prove è un centro di lavoro a cinque assi, realizzato da una nota azienda del settore. Si tratta di una macchina:

- Ergonomica, perché:
 - permette una integrale accessibilità anteriore alla zona di lavoro, grazie all'ampia apertura delle porte
 - permette il caricamento dall'alto con sistemi di manipolazione (es gru o carroponte) fino a centrotavola
 - ha un ingombro pari a soli $17 m^2$, incluso il convogliatore trucioli e l'impianto di refrigerazione
 - rapida e semplice da installare poiché richiede solo un appoggio su 3 punti
- Precisa, perché:
 - ha un sistema di raffreddamento completo munito di un potente gruppo di refrigerazione e compensazione multisensore di serie
 - ha una struttura rigida ad elevata massa statica e peso ottimizzato degli elementi in movimento
 - permette una qualità superficiale fino a $0,15 \mu m$, grazie a motori lineari ad alta precisione, con accelerazioni fino a $2g$ e sistemi di misurazione *MAGNESCALE*
- Versatile, a causa di:
 - Presenza di una tavola rotobasculante con azionamento monolaterale o bilaterale, che la rende universale
 - Possibilità di eseguire lavorazioni di:
 - fresatura ad alta velocità e dinamica
 - fresatura e tornitura integrate
 - truciolatura ad alte prestazioni con coppia elevata
 - realizzazione di pezzi con elevata produttività, grazie al sistema automatico di cambio pallet

Di seguito sono rappresentate alcune lavorazioni eseguibili dal macchinario in questione:

- costruzione di stampi
- componenti per il settore:
 - Aerospace
 - dell'energia
 - medicale
 - utensileria

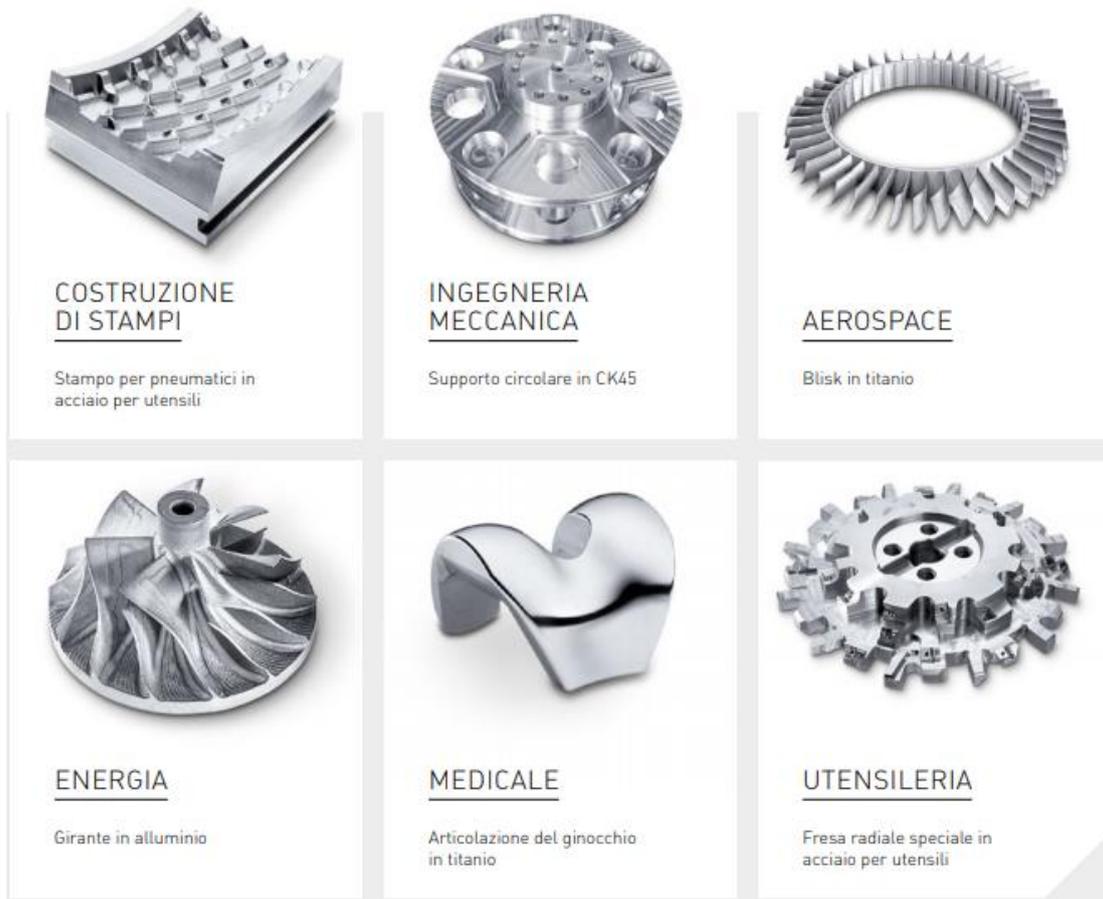


Figura 25. Applicazioni di utilizzo del centro di lavoro impiegato.

A seguire è presente un estratto, tratto dalla scheda tecnica, fornita dal costruttore, delle caratteristiche e peculiarità tecniche del sistema.

Zona lavoro	
Max. corsa asse X	735 mm
Max. corsa asse Y	650 mm
Max. corsa asse Z	560 mm
Dimensioni tavola	
Max. carico tavola	1.000 kg
Lunghezza tavola	500 mm
Larghezza tavola	500 mm
Dimensioni pezzo	
Max. altezza pezzo	500 mm
Mandrino	
Numero di giri standard	15.000 giri/min
Max. numero di giri (facoltativo)	40.000 giri/min
Potenza (100% ED)	16 kW (AC)
Coppia (100% ED)	85 Nm
Magazzino utensili	
Capacità (standard)	30
Max. capacità	180
Corsa rapida	
Max. asse X	40 m/min
Max. asse Y	40 m/min
Max. asse Z	40 m/min

Figura 26. Estratto scheda tecnica del centro di lavoro impiegato.

6.2. Microscopio digitale

Lo strumento utilizzato per l'analisi e la quantificazione, tramite la sua misurazione, dell'usura degli inserti utilizzati nello svolgimento delle prove è il microscopio digitale *Leica DMS300*, il cui utilizzo è stato gentilmente concesso dal personale del laboratorio, presente all'interno dello stabilimento in cui è stata svolta l'attività.

Si tratta di un sistema completo di imaging ed ispezione digitale, che permette di lavorare in modo ergonomico con un elevato comfort di utilizzo, principalmente dovuto al fatto che utilizza un monitor al posto degli oculari.

Tale sistema è costituito da:

- Il corpo dello zoom del *Leica DMS300* con fotocamera (costituito dai gruppi ottica e fotocamera)
- Un sistema di illuminazione a LED, anulare, con diffusore amovibile, che offre una illuminazione ottimale, brillante e duratura, con colori neutri. Il diffusore permette la riduzione dei riflessi provenienti da campioni riflettenti.

Uno stativo a braccio orientabile per un impiego in differenti posizioni di lavoro e per la visualizzazione di grandi campioni o pezzi, che si adatta rapidamente alle altezze del pezzo. Inoltre, se non viene utilizzato il sistema, permette che venga messo di lato per evitare ingombri inutili dell'area di lavoro.

Un obiettivo $0,8x$ in grado di offrire sufficiente ingrandimento a una distanza di lavoro superiore a 110 mm .



Figura 27. Sistema microscopio digitale.

L'ottica presente è caratterizzata da:

- Un raggio zoom $8:1$.
- Un campo di ingrandimento da $15x$ a $120x$ digitale.

Si tratta di una ottica parafoCALE e paracentrica, ovvero non è necessario rimettere a fuoco dopo una variazione dell'ingrandimento, i campioni restano sempre a fuoco al centro del campo visivo in modo ottimale.

La fotocamera, invece:

- Da una risoluzione di 2.5 Mpixel, con sensore *CMOS full HD*
- Da una alta velocità delle immagini dal vivo, fino a 30 immagini al secondo

Esso può essere utilizzato sia in modo stand alone, tramite un monitor HD, o mediante connessione ad un PC. La soluzione utilizzata è quest'ultima, e tramite un software proprietario, fornito dalla casa costruttrice, è stata effettuata l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini, che include la fase delle misurazioni.

Di seguito ne è presentata una videata:



Figura 28. Videata software proprietario per acquisizione e post-process delle immagini.

A seguire è presente un estratto, tratto dalla scheda tecnica, fornita dal costruttore, delle caratteristiche e peculiarità tecniche del sistema.

SPECIFICHE DELLA FOTOCAMERA	
Risoluzione (immagini dal vivo)	HD-ready 1280 × 720 – 50 Hz / 60 Hz – 30 fps Full HD 1920 × 1080 – 50 Hz / 60 Hz / 25 Hz / 30 Hz – 30 fps PC 1600 × 1200 – 10 fps / 1024 × 768 – 24 fps
Risoluzione (singole riprese)	2.5 Mpixel (1824 × 1368) 1.1 Mpixel (1216 × 912)
Risoluzione (video)	HD1080 (1920 × 1080) HD720 (1280 × 720)
Dimensione pixel (risoluzione)	2.35 µm × 2.35 µm
Tipo sensore	Aptina 1/2.3" CMOS
Dimensione sensore	6.1 mm × 4.6 mm
Tempo di esposizione	0.5 msec – 500 msec
Guadagno	1× – 12×
Profondità cromatica	3 × 8 bit = 24 bit
Formato di dati	PC JPG HD MP4
Sistemi operativi	Windows XP, Windows 7, Mac OS X
Software	PC Software Leica LAS & LAS EZ MAC Software Leica Acquire
Configurazione del computer consigliata	PC / Mac, Intel Core 2 Duo, >2.4 GHz, 4 GB RAM, grafica a 24 bit

OBIETTIVO ACROMATICO LEICA DMS300 (0.8×, distanza di lavoro 114 mm)			
		DMS300 alla massima	DMS300 alla minima
Immagine dal vivo: (Full HD)	Risoluzione	142 lp/mm	24 lp/mm
	Max. FoVx	4.06 mm	32.44 mm
	Max. FoVy	2.28 mm	18.25 mm
	Max. DoF	0.178 mm	3.448 mm
	Ingrandimento max.		
	Con monitor da 10"	54.5×	6.8×
Con monitor da 22"	120×	15×	

INTERFACCE ELETTRONICHE	
Computer	USB 2.0, spinotto standard USB tipo B
Presa per alta definizione	HDMI 1.3, spinotto HDMI standard tipo A
Conferma acustica	per registrazione, bilanciamento del bianco, ecc. (disattivabile)
Interruttore di accensione	Disponibile
Selettore PC/HD	Disponibile
Pulsante di reset	Visualizzazione della risoluzione corrente, passaggio alla prossima risoluzione, reset, upload firmware
Telecomando	Telecomando a infrarossi RC2, con batteria a bottone tipo CR2025
Scatto remoto	Scatto remoto a mano o a pedale, con 1.5 m di cavo
Scheda SD (Secure Digital)	Compatibile SD HC, 128 MB – 32 GB
LED di stato	a 3 colori: verde – acceso, giallo – occupato, rosso – errore
Alimentazione	Tramite cavo USB dal computer o da un alimentatore USB esterno da 5 V
Potenza assorbita	5 W

VARIE	
Campo di temperatura di esercizio	+5 °C – 50 °C
Umidità dell'aria relativa	10% – 90%
Dichiarazione di conformità CE	Disponibile
Norme testate	EN 55011 / EN 61010-1 / EN 61326-1

Figura 29. Estratto scheda tecnica microscopio digitale.

6.3. Macchina CMM 3D

Ai fini del rilevamento delle dimensioni dei componenti realizzati, all'interno della linea di produzione è presente la macchina di misura a coordinate modello *DURAMAX*, realizzata dall'azienda *ZEISS* e rappresentata di seguito.



Figura 30. Immagine rappresentativa della macchina CMM 3D utilizzata.

Si tratta di una macchina di misura adatta all'utilizzo in ambiente di produzione, che permette l'acquisizione di contorni e superfici a forma libera.

Caratteristiche salienti:

- Stabilità termica tra $+18^{\circ}\text{C}$ e $+30^{\circ}\text{C}$
- Assenza di necessità di aria compressa
- Design poco ingombrante
- Sistema di smorzamento passivo integrato
- Caricamento da quattro lati
- Guide di scorrimento completamente coperte
- Scansione e misura a singolo punto
- Cambio stilo mediante sistema *CNC*
- Piastra adattatore da 25 mm per una riproducibilità ottimale
- Lunghezza assiale stilo: da 30 a 150 mm
- Lunghezza radiale stilo: da 30 a 65 mm
- Protezione da polvere ed umidità conforme ad *IP54*
- Braccio di supporto per tastiera a monitor
- Spazio di stoccaggio bloccabile per un PC
- Isolamento termico
- Spostabile con carrello elevatore o muletto

Di seguito ne sono presentate altre peculiarità estratte dalla scheda macchina ad essa relativa, fornita dal costruttore.

System description				
Type according to ISO 10360-1:2000	Fixed table cantilever CMM			
Operating mode	Motorized / CNC			
Sensor mounts	Fixed installation			
Software	ZEISS CALYPSO, ZEISS GEAR PRO			
Travel speed	Motorized	in mm/s	Axes	0 to 100
	CNC	in mm/s	Axes	max. 300
		in mm/s	Vector	max. 520
Acceleration		in m/s^2	Axes	max. 1
		in m/s^2	Vector	max. 1.7

Figura 31. Descrizione del sistema.

				DuraMax	
Length measurement error ^{2) 4) 6)} MPE complies with ISO 10360-2: 2009	E0/E40	in μm		2.4 + L/300	18°C - 22°C
				2.7 + L/250	18°C - 26°C
				2.9 + L/200	18°C - 30°C
Repeatability range of E0 MPL complies with ISO 10360-2:2009	R0	in μm		1.7	
Scanning error MPE complies with ISO 10360-4:2000	THP	in μm		2.9	
Required measuring time MPT	τ	in s		55	
Form measurement error ³⁾ MPE for roundness complies with ISO 12181 (VDI/VDE 2617 sheet 2.2)	RONt (MZCI)	in μm		2.4	
Single stylus form probing error MPE complies with ISO 10360-5:2010	PFTU	in μm		2.4	
Multi-stylus form probing error MPE complies with ISO 10360-5:2010	PFTM ³⁾	in μm		3.9	
Multi-stylus dimension probing error MPE complies with ISO 10360-5:2010	PSTM ³⁾	in μm		1.2	
Multi-stylus location probing error MPL complies with ISO 10360-5:2010	PLTM ³⁾	in μm		2.7	

Figura 32. Caratteristiche della macchina: accuratezza.

ZEISS DuraMax	Dimensions in mm						Weight in kg		
	Measuring range			Working range (max. workpiece size)			Max. load		
	X axis	Y axis	Z axis	Width	Length	Height			
	G104	G105	G106	821	820	815			
	500	500	500	500	500	500	100		
	Overall CMM dimensions			Footprint		Working height		Assembly space	Measuring machine
	Width	Length	Height	Width	Length	Height	Height	Height	
	86	85	87	w1	l1	823	h1	c1	
Basic model	1080	1360	1803	670	870	230	-	≥200	350
With standard base	1080	1360	2480	740	910	905	-	≥200	445 / 465 ¹⁾
With shopfloor base	1770	1710	2511	732	948	940	1038	≥200	515 / 535 ¹⁾

1) When using a ZEISS rotary table on the ZEISS DuraMax, including rotary table box.

Figura 33. Caratteristiche della macchina: dimensioni relative alla macchina.

Technical features		
	DuraMax	DuraMax HTG
Length measurement system	Glas ceramic, resolution 0.2 µm, carrier material: Robax	Glas ceramic, resolution 0.2 µm, carrier material: Zerodur
Controller	Based on ZEISS C99L Protection class IP53	Based on ZEISS C99L Protection class IP53
Clamping device	Material: cast iron, mounts: 25 M10 threads, 100 mm hole spacing, flatness: in accordance with DIN 876-III	
Ambient conditions		
	DuraMax	DuraMax HTG
Relative humidity	40% - 70% (without condensation)	40% - 70% (without condensation)
Ambient temperature	18°C - 30°C	15°C - 40°C
Floor vibrations	ZEISS DuraMax, ZEISS DuraMax RT and ZEISS DuraMax HTG with passive vibration damping.	

Figura 34. Caratteristiche della macchina: caratteristiche tecniche e condizioni ambiente.

Tramite tale macchina, a causa del fatto che essa esegue le misurazioni delle dimensioni geometriche dei componenti lavorati dal centro di lavoro sul quale sono state eseguite le prove, è stato possibile valutare la variazione, se effettivamente presente, delle caratteristiche dimensionali relative alle superfici lavorate all'interno della fase oggetto di studio.

Questo grazie al fatto che per la sua manutenzione, l'esecuzione dei programmi di misura dei componenti lavorati e la gestione dei dati di misura, essa è collegata ad un PC munito di software, fornito dalla casa costruttrice, col quale è stato possibile esportare i dati relativi alle misurazioni svolte sui componenti oggetto di prove, maneggiati in seguito con appositi software statistici.

Di seguito sono elencate le caratteristiche dimensionali sopracitate:

- Concentricità foro, misurata in due punti e divisa in inferiore e superiore
- Conicità foro
- Diametro alesatura inferiore
- Diametro alesatura superiore
- Diametro foro, misurato in quattro punti differenti e divise in: centro inferiore, centro superiore, inferiore, superiore
- Perpendicolarità foro
- Rotondità alesatura inferiore
- Rotondità alesatura superiore
- Rotondità foro

Le caratteristiche indicate con la dicitura "alesatura" riguardano le superfici, rispetto alla rappresentazione a seguire, indicate con la denominazione *Dk*.

Per quanto riguarda quelle misurate in più punti, invece, il numero dei rilevamenti (superiore ad uno) è dovuto principalmente alle dimensioni in gioco ed alle specifiche relative al componente.

Tali caratteristiche, con relativa denominazione, verranno richiamate in seguito nella parte in cui si tratterà la valutazione dell'influenza dei parametri di lavorazione sulle superfici lavorate.

Rappresentazione della geometria del componente con le caratteristiche dimensionali evidenziate:

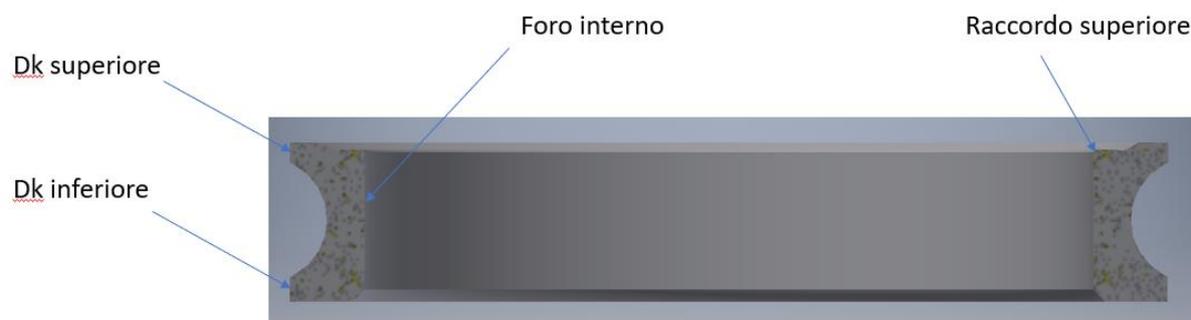


Figura 35. Geometria componente, con caratteristiche dimensionali evidenziate.

Per ognuna delle caratteristiche sono stati considerati:

- L'effettivo valore misurato
- Gli estremi del range di tolleranza, superiore ed inferiore.

7. Caratteristiche della lavorazione

7.1. Geometria del componente

Dopo aver identificato i componenti, in seguito alle considerazioni riportate nel capitolo introduttivo, ed esaminato il relativo processo produttivo, si è concentrata l'attenzione sul ciclo di lavorazione riguardante l'operazione di tornitura, oggetto di studio.

Di seguito è rappresentata una geometria simile a quella reale del componente lavorato, includente le superfici passive delle lavorazioni in esame.

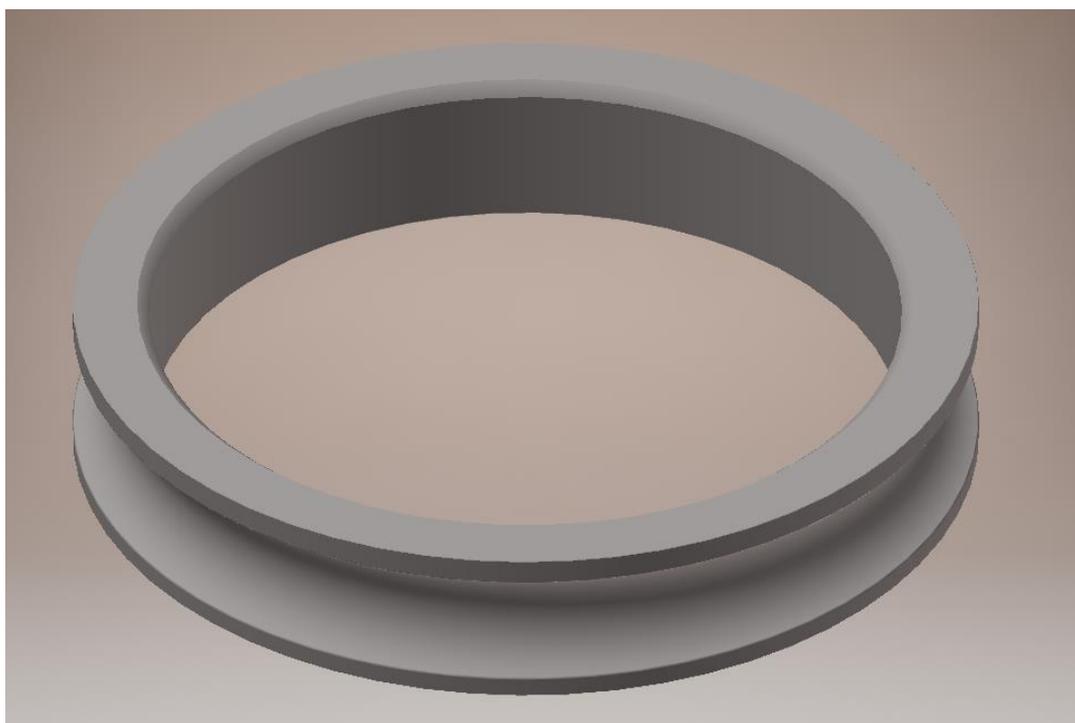


Figura 36. Geometria componente, vista isometrica.



Figura 37. Geometria componente, vista in sezione.

7.2. Identificazione fase da ottimizzare

Dopo aver preso visione del ciclo di tornitura, si è identificata (dopo simulazione sul software *CAM*, utilizzato in azienda, dell'intero processo) la fase avente geometria di lavorazione più semplice (quindi più simile a quella che si sarebbe potuta svolgere su di un provino) sulla quale effettuare delle considerazioni, e che, nel caso in esame, ne influenza anche maggiormente la durata.

A tal proposito, di seguito, sono rappresentate delle videate catturate durante l'utilizzo del software *CAM* per l'individuazione della lavorazione, in particolar modo:

- La simulazione 3D della lavorazione
- Il percorso utensile

Entrambi relativi alla fase di lavoro oggetto di studio.

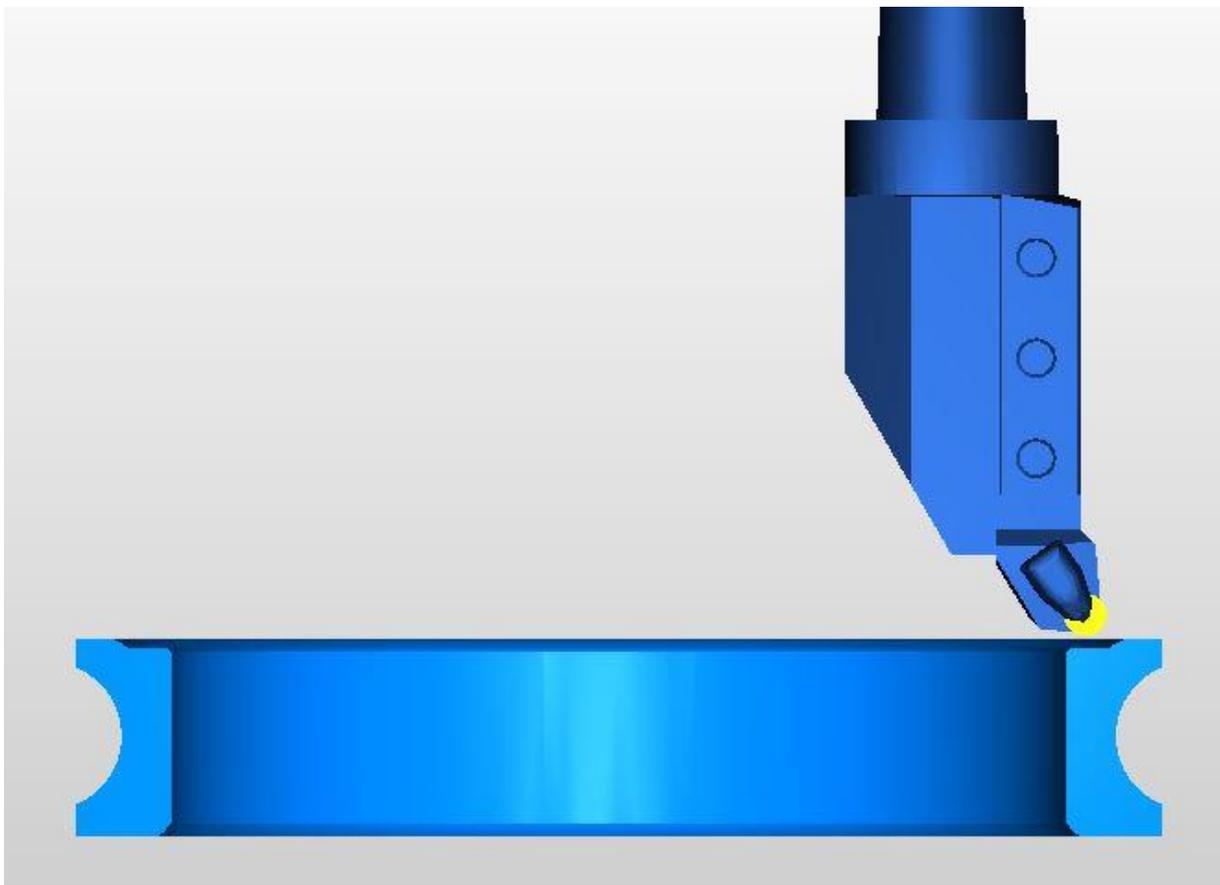


Figura 38. Simulazione 3D della lavorazione.

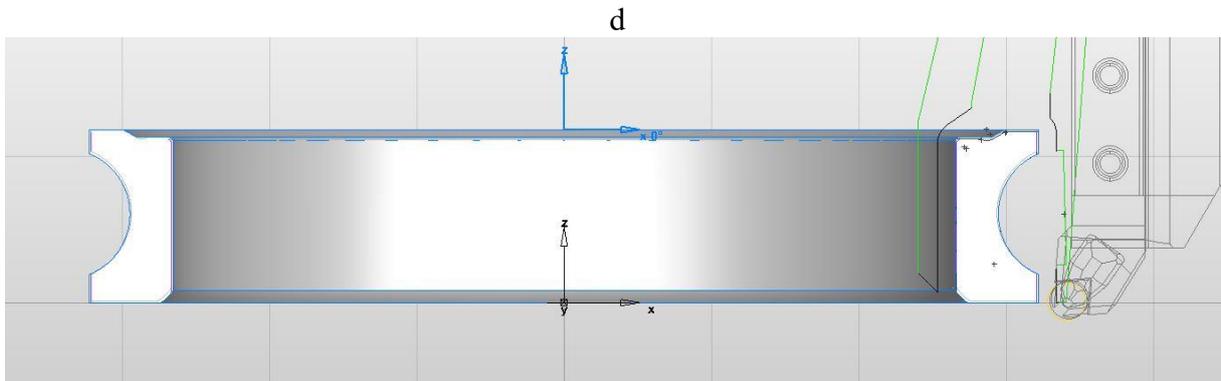


Figura 39. Simulazione del percorso utensile relativo agli spostamenti del suo centro.

Tale fase, scelta come oggetto di studio per l'apporto di migliorie in termini di riduzione dei tempi e quindi dei costi, e di ottimizzazione dell'usura sull'inserto, cui segue anche una migliore esecuzione della lavorazione, riguarda la lavorazione delle seguenti superfici:

- Diametri spallamenti esterni (Dk)
- Foro interno cilindrico
- Raccordo superiore interno

Tali superfici possono essere identificate nella figura seguente.

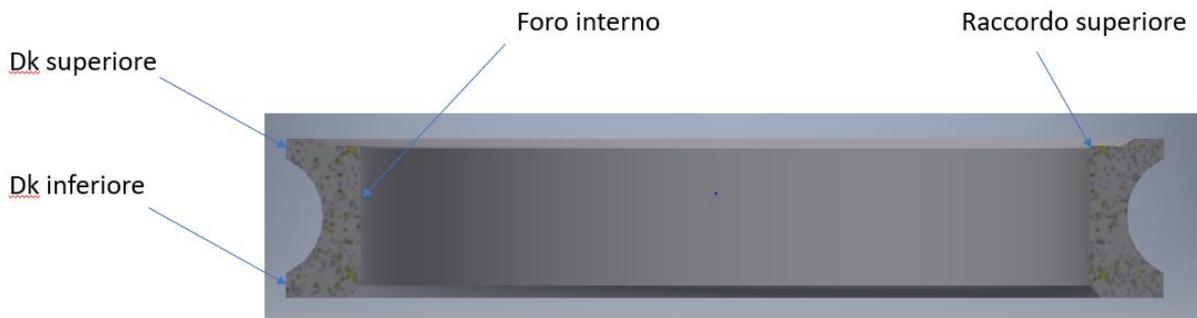


Figura 40. Geometria componente, identificazione superfici da lavorare.

Si può osservare che si tratta esclusivamente di operazioni di tornitura cilindrica esterna ed interna.

7.3. Informazioni preliminari post presa visione del componente

Preliminarmente è stata presa visione di:

- Materiale del componente e delle sue caratteristiche in termini di composizione chimica, trattamenti termici subiti e lavorabilità.

- Geometria e materiale dell'inserto, con i relativi limiti di lavorazione sul materiale del componente in esame.
- Centro di lavorazione sul quale è eseguita la suddetta lavorazione e sue caratteristiche.
- Scheda di controllo dimensionale, eseguito su macchina tridimensionale di misura a coordinate, affinché si potessero rilevare eventuali variazioni indotte dalla modifica dei parametri di lavorazione.
- Dispositivo adottato per il rilevamento dell'usura e relativo software che ne permette l'utilizzo.

7.3.1. Materiale del componente

Il componente analizzato è fatto in acciaio per componenti Aerospace. In particolare, si tratta dell'*AISI M50 VIM VAR* secondo la normativa standard, a sua volta poi identificato da un riferimento differente a seconda del costruttore. Di seguito è presente un estratto dalla scheda tecnica indicante ciò.

AMS	Timken Aerospace	Barden Corp.
6490 (VAR)	EMS 5.1	SA-2947
6491 (VIM-VAR)	EMS 5.4	SNR
G.E.	EMS 5.7	LA 14.05.01
B50TF103	EMS 88	Bell Helicopter
C50TF56	SNFA	299-947-087
Pratt & Whitney	CFR 5200	NHBB
PWA 793	McGill Mfg.	PES 1.105
PWA 725	10-42	RBC
CPW 378	Snecma	MP-19
Rolls-Royce	DMD 119.20	Winsted
MSRR 6083	RHP/AEB	MS-115
MRC-SKF	14-06	
MS-45	FAG	
MS-171	FL-LA 2372.2 SX	
MS-187	PL 1.801A	

Figura 41. Riferimento del materiale in esame rispetto ai differenti costruttori.

È un acciaio a medio tenore di carbonio, costituito da elementi che formano importanti carburi come cromo, molibdeno e vanadio. La composizione è fornita di seguito:

Chemical Analysis

Carbon	0.80 - 0.85	Manganese	0.15 - 0.35
Chromium	4.00 - 4.25	Molybdenum	4.00 - 4.50
Silicon	0.25 max	Sulfur	0.008 max
Nickel	0.15 max	Phosphorus	0.015 max
Vanadium	0.90 - 1.10	Cobalt	0.25 max
Tungsten	0.25 max	Copper	0.10 max

Figura 42. Composizione chimica del materiale.

MATERIAL	FOR REQUIREMENTS	MELT PRACTICE	TYPICAL SPECS.	CORROSION RESISTANCE	TYPICAL TEMP. LIMIT	ALT. TO:
M50 VIM-VAR	High Temperature Steel, Aircraft Bearings	VIM-VAR	AMS 6490AMS 6491	-	700°F (371°C)	-

Figura 43. Ulteriori specifiche relative al materiale.

Si tratta di una lega da fusione, che dopo un processo di indurimento, possiede una elevata durezza e resistenza a compressione alle alte temperature, con ottima resistenza a stress multiassiali, softening ad alte temperature di servizio e buona resistenza all'ossidazione.

Viene prodotta con i processi di fusione indotta a vuoto (*Vacuum-Induction Melting, VIM*) e rifusione con arco in vuoto (*Vacuum-Arc Remelting, VAR*). Questo processo provvede un ottimo controllo e riproducibilità della composizione chimica, microstruttura ed elevata resistenza a fatica. È ampiamente utilizzato per i cuscinetti dei motori aeronautici, poiché operano ad elevate temperature. Con la sua combinazione di buona durezza a caldo ed eccellente resistenza a fatica di contatto, tale materiale è adatto per parti molto stressate come cuscinetti e ruote operanti ad elevate temperature, circa 427 °C.

Vediamo di seguito alcune proprietà fisiche del materiale:

PHYSICAL PROPERTIES

Density: 0.29 lb/in³ (7.87 g/cm³)

COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

Temp Range		in / in / °F	mm / mm / °C
°F	°C	(x 10 ⁻⁶)	(x 10 ⁻⁶)
-100-70	-73-21	5.59	10.06
70-200	21-93	6.23	11.21
70-300	21-149	6.39	11.50
70-400	21-204	6.58	11.84
70-500	21-260	6.72	12.10
70-600	21-316	6.83	12.29
70-700	21-371	6.95	12.51
70-800	21-427	7.05	12.69
70-900	21-482	7.20	12.96
70-1000	21-538	7.38	13.28

Heat treated to 63-64 HRC.

MODULUS OF ELASTICITY

Test Temperature		Modulus	
°F	°C	10 ⁶ psi	GPa
70	21	29.5	203.4
200	93	27.5	189.6
400	204	24.5	168.9
600	316	21.5	148.2
800	427	18.5	127.6
1000	538	15.5	106.9
1200	649	12.5	86.2

Figura 44. Proprietà fisiche materiale: coefficienti.

ELEVATED TEMPERATURE HARDNESS

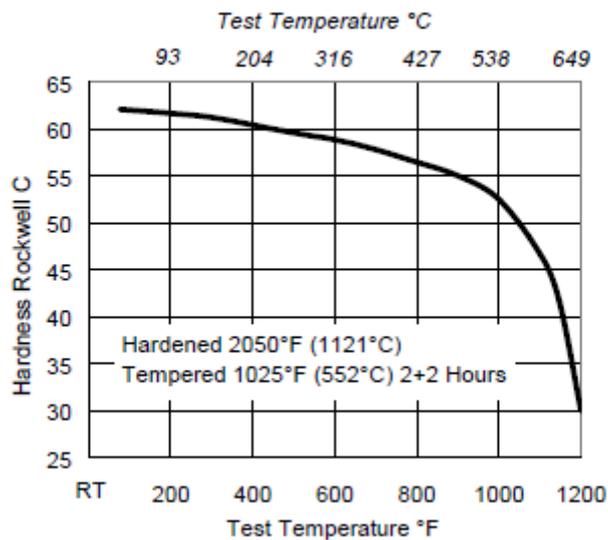


Figura 45. Proprietà fisiche materiale: andamento durezza al variare della temperatura.

A causa dell'alto livello di purezza della lega, le parti possono essere finite con un'elevata lucentezza.

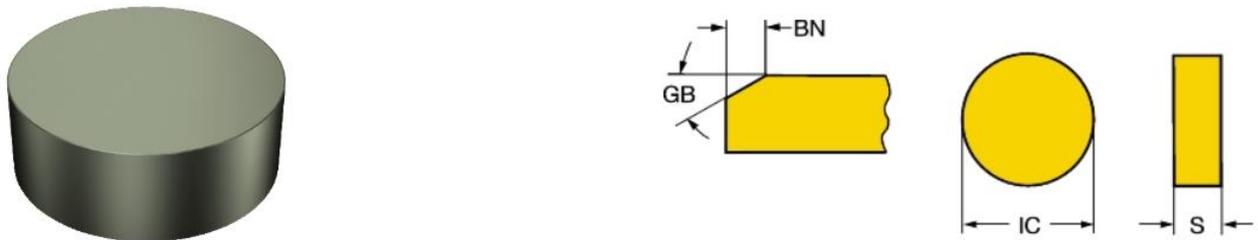
Tale materiale si usa in una elevata varietà di applicazioni, nell'industria dei cuscinetti e quella missilistica, che richiedono alta resistenza all'usura e ad alte temperature. Si utilizza per cuscinetti in motori di aerei e di turbine a gas che hanno temperature di servizio fino a 371°C .

Anche per applicazioni che richiedono durezza a caldo.

Questa lega può anche essere considerata per la realizzazione di inserti dove sono richiesti alti livelli di prestazioni.

7.3.2. Geometria e materiale inserto

L'inserto, utilizzato per lo svolgimento delle prove, è identificato dalla sigla *RNGN120700T01020 670*, prodotto dall'azienda *Sandvik Coromant*.



Questa è una rappresentazione generica e dovrebbe essere utilizzata solo come un'approssimazione dell'aspetto.

Figura 46. Foto e geometria dell'utensile, dal sito del costruttore.

Si tratta di un inserto per tornitura realizzato in materiale ceramico, a due taglienti, su cui non è presente alcun tipo di rivestimento.

Gli inserti sono identificati tramite codici alfanumerici secondo la normativa *ISO 1832*, che impiega 12 simboli, nel caso in esame:

4 lettere:

- *R*, rappresenta la forma, in questo caso tonda
- *N*, rappresenta l'angolo di spoglia dorsale, in questo caso pari a 0°
- *G*, rappresenta la tolleranza sul cerchio inscritto, in questo caso pari a $\pm 0.025\text{ mm}$
- *N*, rappresenta la tipologia di inserto, in questo caso piatto pieno

3 gruppi di 2 cifre:

- *12*, rappresenta la lunghezza del tagliente, trattandosi di un tondo, il diametro, pari a 12.7 mm (identificato in figura da *IC*)
- *07*, rappresenta lo spessore dell'inserto, in questo caso 7.938 mm (identificato in figura da *S*)

- 00 , rappresenta il raggio di raccordo tra i due taglienti, in questo caso si tratta di un inserto pieno

I lettera:

- T , rappresenta la condizione del tagliente, in questo caso a fascia negativa, quindi l'avanzamento è ammesso nei due versi

2 numeri:

- 010 , rappresenta la larghezza dello smusso, pari a 0.10 mm (identificato in figura da BN)
- 20 , rappresenta l'angolo dello smusso, pari a 20° (identificato in figura da GB)

La restante parte, invece, sono informazioni supplementari scelte dal costruttore:

- 670 , rappresenta la qualità del materiale

Gli inserti in ceramica possono essere utilizzati in svariate applicazioni nel campo dell'asportazione di truciolo, poiché presentano una eccellente resistenza al calore ed usura alle alte velocità di taglio. In particolare, sono molto diffusi per la lavorazione di materiali duri (come gli acciai temprati) e/o difficili (come le leghe a base nichel).

In particolare, riguardo alla qualità della ceramica dell'inserto in questione ($CC670$), si tratta di una ceramica rinforzata con *whisker*, che sfrutta il carburo di silicio (SiC_w) filiforme per incrementare notevolmente la tenacità e per consentire l'utilizzo di refrigerante.

7.4. Parametri di taglio

Bisogna bilanciare la velocità di taglio per creare sufficiente calore nella zona di taglio (rendendo plastico il truciolo), considerando che bisogna evitare un notevole sviluppo di calore per non favorire la formazione dell'usura ad intaglio.

L'avanzamento dovrebbe essere scelto in maniera tale da dare al truciolo il giusto spessore, evitando che il materiale si incrudisca. In più, un elevato spessore del truciolo favorisce lo sfaldamento del tagliente.

Aumentando l'avanzamento e la profondità di taglio, bisogna ridurre la velocità di taglio.

I limiti dei parametri sopra citati variano al variare della durezza del materiale del componente e della dimensione del grano.

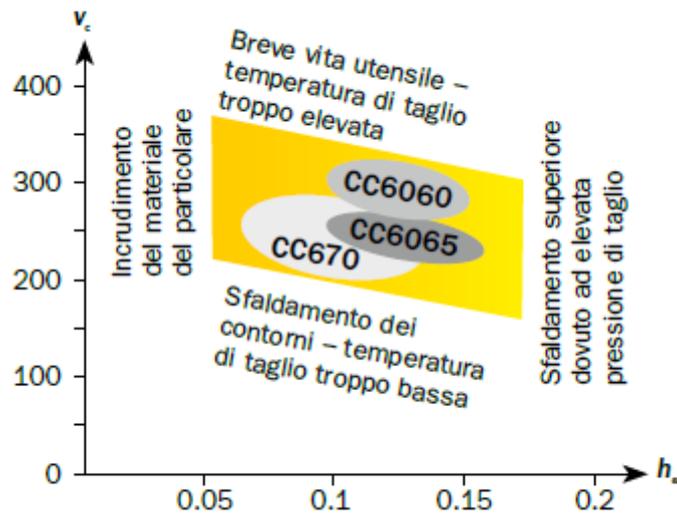


Figura 47. Andamento della velocità di taglio, al variare dello spessore massimo del truciolo.

Come accennato in precedenza tale inserto può essere utilizzato per la tornitura di componenti in materiale duro (acciaio temprato) e difficile da lavorare (superlega resistente al calore). Di seguito sono rappresentati dei parametri di taglio consigliati dalla casa costruttrice, ed il relativo range nel quale possono essere variati, per ciascuna delle categorie di materiale sopra citate.

Start values

S	ap 1.9 mm(0.6-3.2)
	fn 0.2 mm/r(0.11-0.31)
	vc 275 m/min(305-235)
H	ap 1 mm(0.1-1.9)
	fn 0.35 mm/r(0.19-0.54)
	vc 105 m/min(120-95)

Figura 48. Valori di partenza per lavorazione materiali differenti, forniti dal costruttore.

Dove:

- *H* sta per *hardened materials*, quindi materiali induriti.
- *S* sta per *Heat resistant super alloys*, quindi superleghe resistenti al calore.

Nel caso in esame si è eseguita l'operazione di tornitura su componenti in materiale indurito.

8. Pianificazione degli esperimenti ed esecuzione prove

Si è deciso di impartire degli aumenti costanti dei parametri oggetto di studio a partire da quelli utilizzati in precedenza:

- +0.03/+0.06/+0.09 *mm/giro*, per la velocità di avanzamento
- +10/+20/+30 *m/min*, per la velocità di taglio

Queste sono state ritenute variazioni accettabili, sempre tenendo conto di:

- Limiti di parametri di lavorazione dell'inserto sul materiale del componente, forniti dalla casa costruttrice dell'inserto, descritti precedentemente.
- Limiti del centro di lavorazione, forniti dalla scheda tecnica.
- Tipologia di serraggio del pezzo, dettato dalla geometria in lavorazione e identificato dalla scheda di montaggio fornita dall'ufficio tecnico.

Dopo le considerazioni svolte sui fattori precedenti, si è proceduto a stilare l'elenco delle prove dettato dalla pianificazione degli esperimenti.

Avendo:

- 2 variabili oggetto di variazione
- 3 fattori distinti per ognuno di essa

Risulta possibile effettuare un numero distinto di prove pari a 9 ($=3^2$), determinabile con il metodo di Taguchi.

Tale metodo proviene dalla progettazione "robusta", e consta nel fatto di ritenere che la varianza della variabile di risposta dipende almeno da alcuni dei fattori sperimentali controllabili, quindi si propone di individuare sperimentalmente le condizioni "ottime" di produzione.

Occorre puntualizzare che è stato utilizzato solo per la redazione del piano degli esperimenti, mediante il software *MINITAB*.

Seguono delle videate tratte dal software, ai fini della sua definizione.

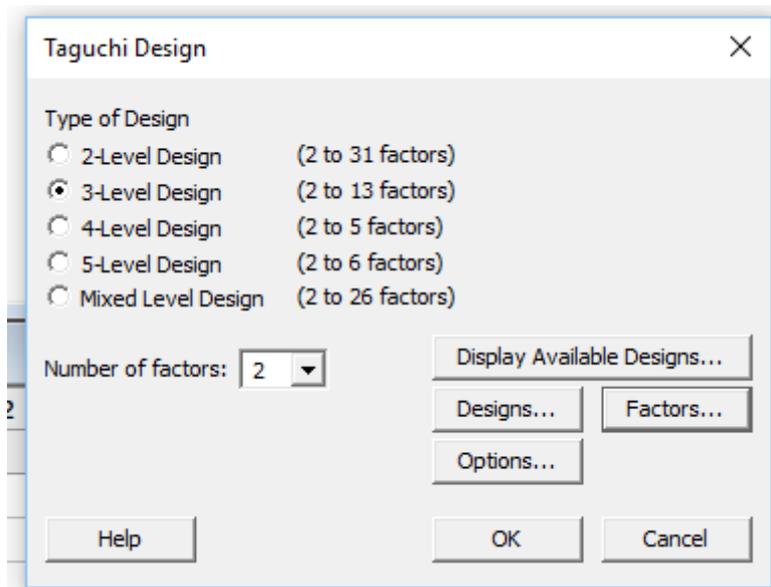


Figura 49. Scelta del numero dei livelli del design in funzione del numero di fattori.

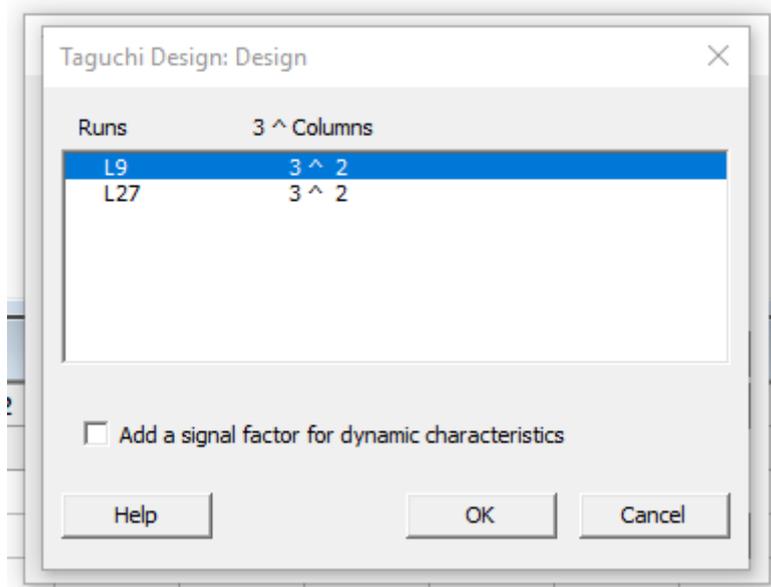


Figura 50. Scelta del numero di prove, dopo aver identificato il numero di fattori.

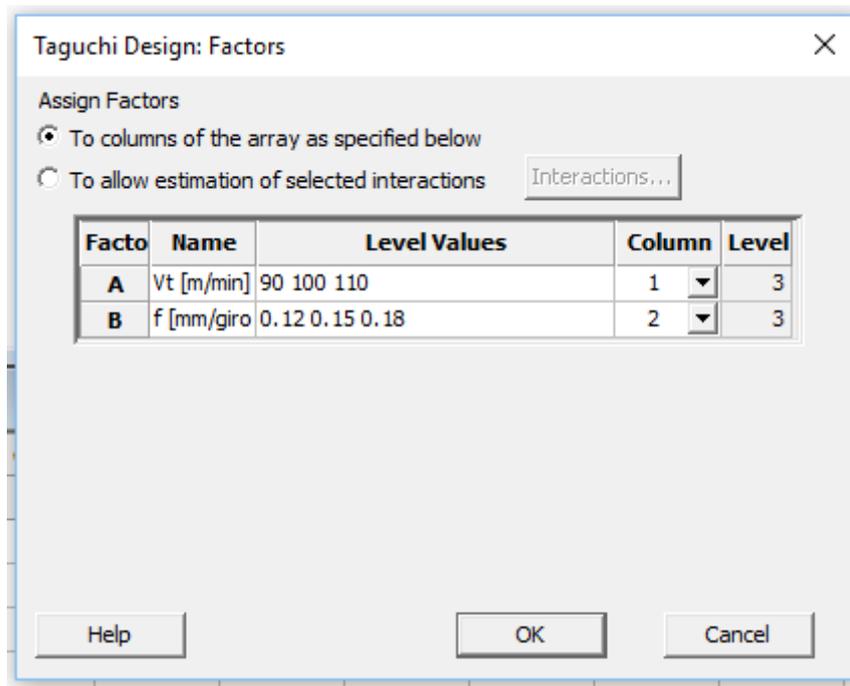


Figura 51. Assegnazione dei fattori e dei relativi valori.

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L9(3²)
 Factors: 2
 Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2

Figura 52. Residuo sommario *MINITAB*.

Con:

- *Columns of L9(3⁴) array: 1 2* (vettori rappresentanti i valori delle variabili)

Dove:

- Numero di livelli di design: 3, pari al numero di valori per ciascuna variabile.
- Numero di fattori (*factors*): 2, pari al numero delle variabili.
- *Design: L9*, quindi 9 *runs* (pari al numero delle prove).

- Numero di esperimenti: 3^2 numero di colonne, pari al numero di fattori.

Cui segue la seguente tabella:

Vt [m/min]	f [mm/giro]
90	0.12
90	0.15
90	0.18
100	0.12
100	0.15
100	0.18
110	0.12
110	0.15
110	0.18

Tabella 1. Elenco parametri per ciascuna prova.

Per ciascuna prova, prima di effettuare la relativa messa in macchina del pezzo con il programma munito di parametri aggiornati, è stata eseguita una simulazione sul software CAM per valutare il nuovo tempo risultante della lavorazione, per valutare anche il vantaggio che ne deriva dalla variazione di questi.

Dopo aver simulato tutte le prove se ne sono registrati i tempi residui in una tabella ed il loro andamento in un grafico, posti a seguire:

N° prova	f [mm/giro]	S [m/min]	t [min]
1	0.12	90	9.27
2	0.12	100	8.33
3	0.12	110	7.48
4	0.15	90	7.56
5	0.15	100	7.11
6	0.15	110	6.34
7	0.18	90	6.55
8	0.18	100	6.16
9	0.18	110	5.44

Tabella 2. Elenco parametri per ciascuna prova con relativa durata simulata su CAM.

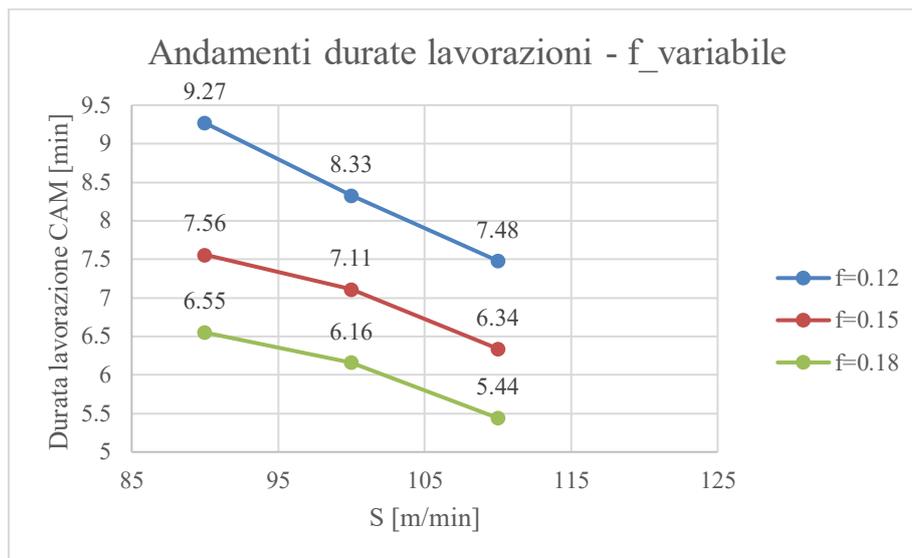


Figura 53. Andamento durata lavorazione, al variare della velocità di taglio, per diversi valori dell'avanzamento.

Da cui si osservano i valori dei due parametri che permettono la più bassa durata di lavorazione, che dovranno poi essere testati in macchina per valutarne l'effettiva efficacia.

Dopo aver stilato l'elenco delle prove, si è provveduto a mettere in macchina i componenti variando per ogni pezzo i parametri all'interno del listato di lavorazione e mettendo da parte l'inserito, per ogni prova, sul quale verrà poi eseguita la successiva analisi riguardante l'usura di esso.

Dopo aver svolto le prime prove, in particolare dopo quella svolta coi parametri $a=0.15$ mm/giro $Vt=110$ m/min, si è riscontrato a livello visivo sul pezzo una discontinuità di tonalità sulla colorazione della superficie cilindrica interna appena lavorata, attribuibile alla formazione di una possibile conicità.

A causa di tale motivo, si è optato per modificare il piano degli esperimenti, sempre in accordo alle considerazioni fatte per stilare quello precedente, onde evitare il ripresentarsi di questa problematica. Ciò è stato fatto evitando di impartire ulteriori aumenti della velocità di avanzamento, ritenuta la principale responsabile della fenomenologia descritta prima.

Anche in questo caso, prima della messa in macchina, si è eseguita la simulazione per ogni prova sul software CAM per valutare i nuovi tempi di lavorazione.

N° prova	f [mm/giro]	S [m/min]	t [min]
1	0.12	90	9.27
2	0.12	100	8.33
3	0.12	110	7.48
4	0.15	90	7.56
5	0.15	100	7.11
6	0.15	110	6.34
7	0.12	120	7.12
8	0.15	120	6.04
9	0.15	130	5.38

Tabella 3. Elenco parametri per ciascuna prova con relativa durata simulata su CAM, dopo aver variato il piano degli esperimenti.

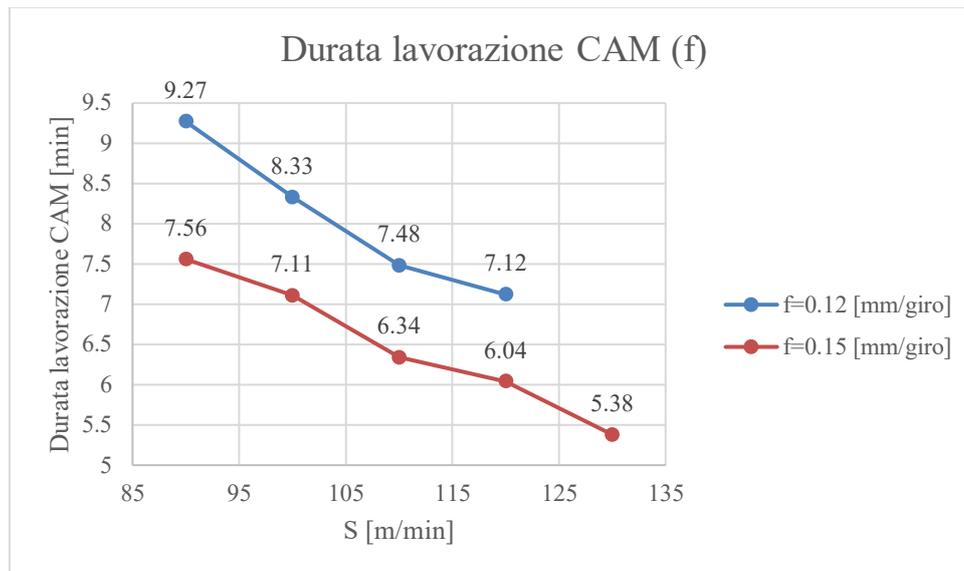


Figura 54. Andamento durata lavorazione, al variare della velocità di taglio, per diversi valori dell'avanzamento, dopo aver variato il piano degli esperimenti.

Per le prove svolte in macchina con i parametri del nuovo piano degli esperimenti, non sono stati riscontrati i problemi prima descritti, quindi ognuna di esse dopo la valutazione riguardante l'usura sull'inserto potrà essere tenuta in considerazione come eventuale ottimale ai fini dell'analisi.

Per ogni prova poi è stata tenuta traccia dell'identificativo del pezzo per valutare successivamente l'impatto della variazione indotta nel processo sul controllo geometrico delle superfici lavorate.

9. Analisi sui valori assunti dall'usura

Dopo aver eseguito le prove in macchina e numerato gli inserti utilizzati, per legarli singolarmente alla variazione di parametri, imposta dal piano degli esperimenti, rispetto ai valori di partenza, si è proceduto alla caratterizzazione degli stessi ed alla analisi della relativa usura.

In particolare, tramite l'utilizzo di un microscopio digitale, descritto nel dettaglio in una opportuna sezione ad esso dedicata, prima si è presa visione dei meccanismi di usura, indotti dalla lavorazione del componente sul tagliente dell'inserto, riscontrando la presenza di:

- Usura sul fianco
- Formazione di intaglio

Poi, in concomitanza a quanto detto sopra, con il dispositivo citato precedentemente, sono state eseguite delle quantificazioni dell'entità di tali meccanismi indotti, al fine di valutarne, per ognuna di esse e per ogni inserto utilizzato per la realizzazione delle prove, il valor minimo, il massimo ed il medio, che sono stati utilizzati in seguito per la redazione di determinate analisi di tipo statistico, al fine di trarre valutazioni utili per il miglioramento, tramite ottimizzazione, del processo di taglio.

Seguono le foto di uno degli inserti utilizzati, catturate mediante l'utilizzo del microscopio digitale, e caratterizzate, tramite la quantificazione numerica dell'entità dell'usura, con un opportuno software, fornito dalla casa costruttrice di questo, che permette il post processamento dell'immagine al fine di eseguire tali misurazioni.

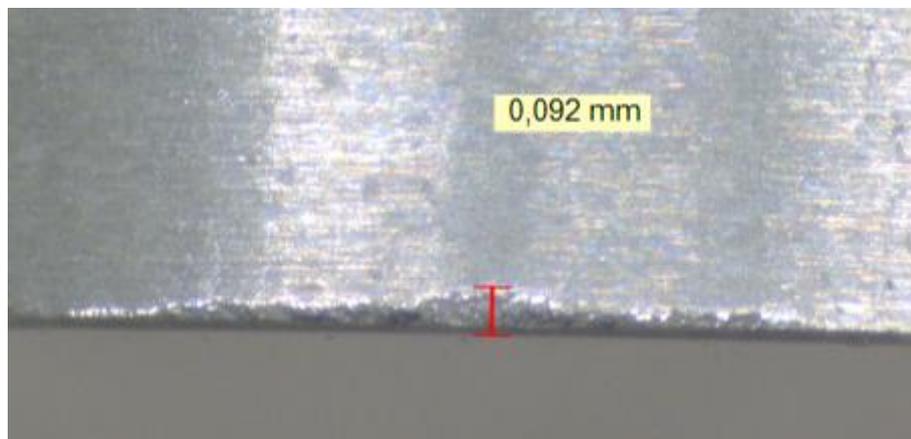


Figura 55. Usura sul fianco.

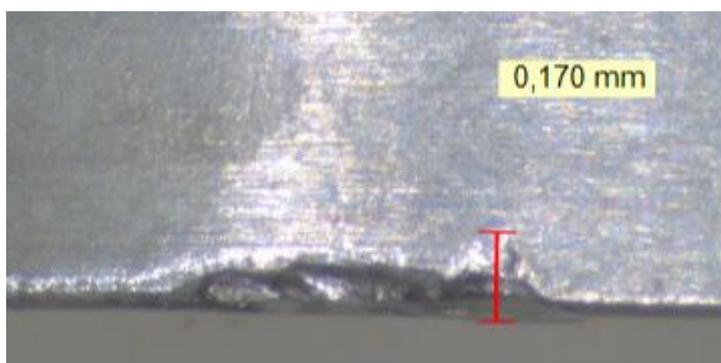


Figura 56. Formazione di intaglio.

Si è effettuato l'iter sopra descritto, mediante qualificazione e quantificazione numerica dei meccanismi di usura e della loro entità, su tutti gli inserti utilizzati nelle prove, sono stati registrati i dati ottenuti in una tabella e, mediante un foglio di calcolo *Excel*, ne è stata eseguita una analisi preliminare al fine di valutare per ognuno di essi il valor minimo, il massimo ed il medio:

N° prova	Vb_max [mm]	Vn_max [mm]	Vb_min [mm]	Vn_min [mm]	Vb_med [mm]	Vn_med [mm]
1	0.079	0.137	0.063	0.071	0.070	0.113
2	0.075	0.125	0.042	0.078	0.057	0.092
3	0.114	0.190	0.043	0.052	0.081	0.110
4	0.076	0.135	0.057	0.090	0.068	0.114
5	0.104	0.117	0.036	0.049	0.065	0.081
6	0.136	0.112	0.051	0.045	0.077	0.078
7	0.055	0.081	0.026	0.038	0.040	0.062
8	0.043	0.178	0.035	0.053	0.039	0.118
9	0.063	0.161	0.047	0.051	0.053	0.104

Tabella 4. Valori dell'usura rilevati per ciascuna delle prove.

Di tali valori ne è stato rappresentato, in relazione alla tipologia di usura, l'andamento mediante grafici a dispersione, poiché si tratta di valori numerici quantificati dopo l'esecuzione di singole prove sperimentali, ciascuna in condizioni, a livello di parametri di taglio, differenti.

Tutto questo per la valutazione dell'entità dello scostamento del valore rilevato del meccanismo di usura dal minimo al massimo, all'interno dell'esecuzione della medesima prova, quindi coi parametri di taglio fissati.

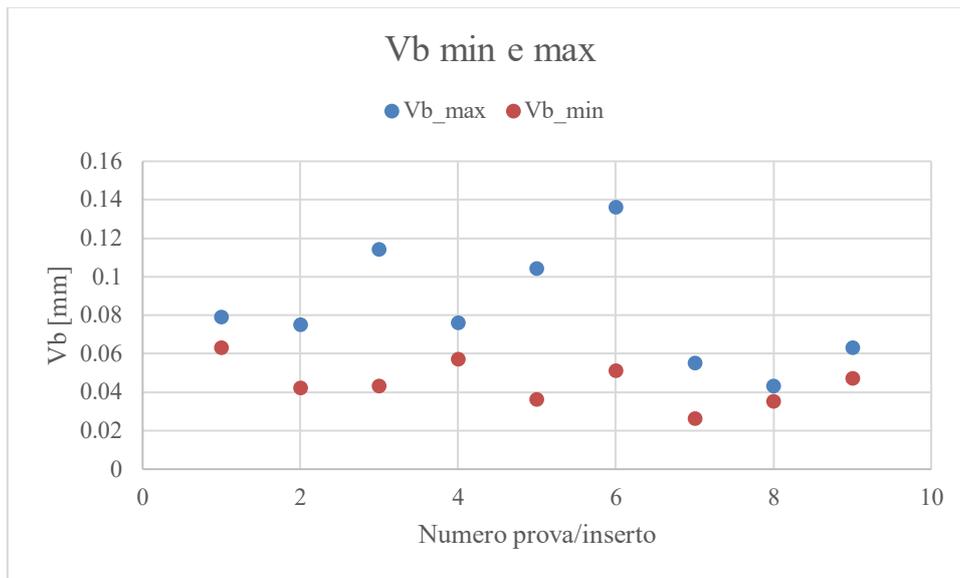


Figura 57. Andamenti dei Vb (*max e min*) al variare del numero di prova/inserto.

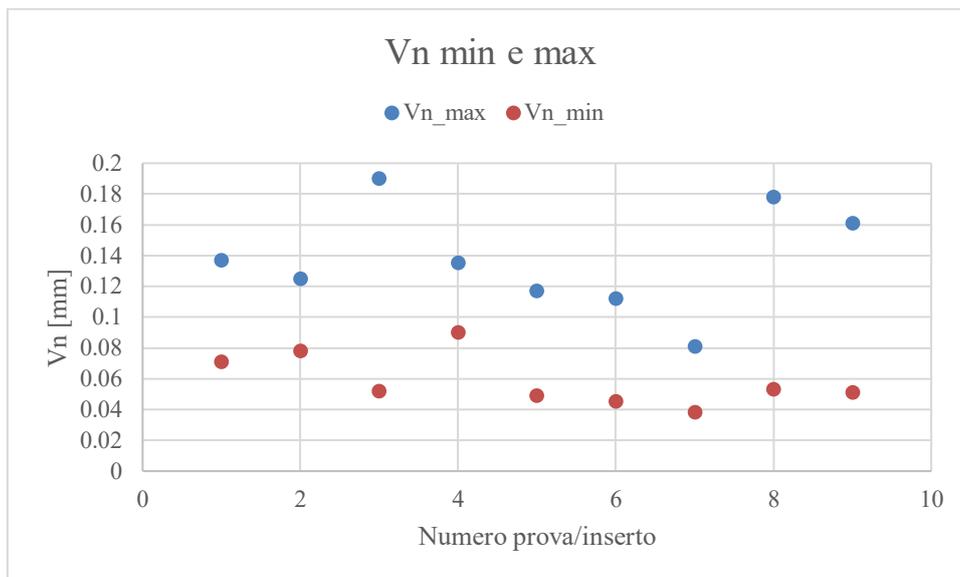


Figura 58. Andamenti dei Vn (*max e min*) al variare del numero di prova/inserto.

Dopo aver rilevato i valori numerici assunti, in relazione alla variazione di parametri imposti, al fine di identificare gli stessi, considerati ottimali, che permettono la formazione del valor minimo dei meccanismi di usura rilevati sugli inserti, sono state effettuate delle analisi statistiche mediante l'utilizzo del software *MINITAB*.

In particolare, sono state svolte delle analisi di:

- **Regressione lineare multipla**, per identificare se è presente un qualche tipo di relazione fra le variabili indipendenti del processo ed il risultato ottenuto (variabile dipendente), quale (nel caso in cui sia presente una relazione) fra le due variabili ha la relazione più forte con la risposta, fornendo una equazione del modello, e qual è il valore del parametro dominante, considerato ottimale, dopo lo svolgimento di tale analisi.
- **Analisi della varianza a due fattori (inclusa nella regressione)**, per stimare la variabilità delle osservazioni a partire dall'analisi dei dati e per identificare la rilevanza variabili indipendenti rispetto alla risposta.

9.1. Svolgimento delle analisi sul software MINITAB

9.1.1. Regressione

Di seguito è mostrato l'iter per l'esecuzione di tale analisi.

Individuazione della tipologia di analisi e diverse scelte/settaggi

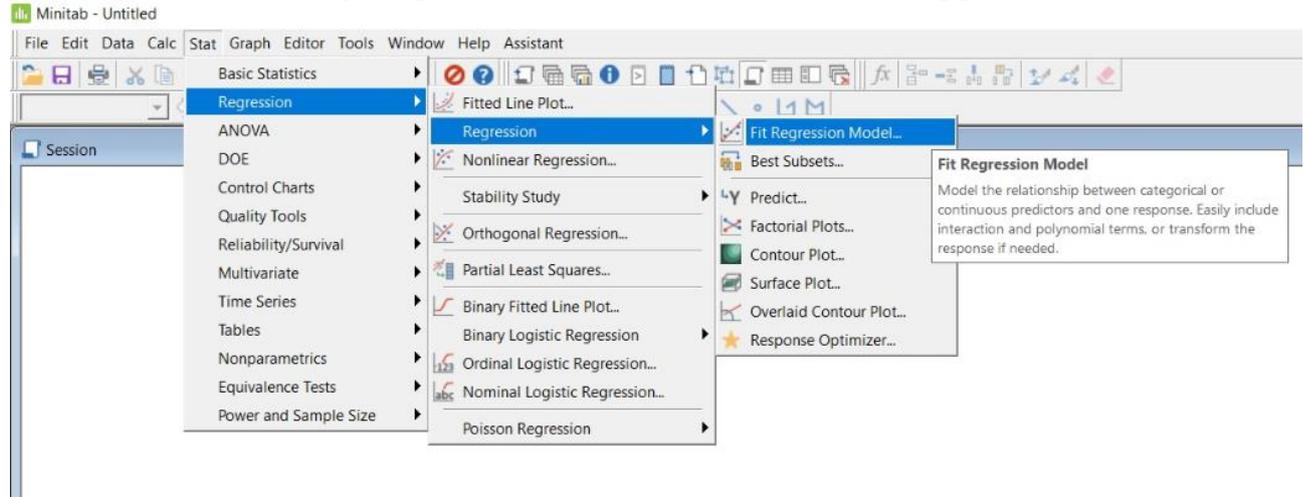


Figura 59. Individuazione tipologia di analisi su MINITAB.

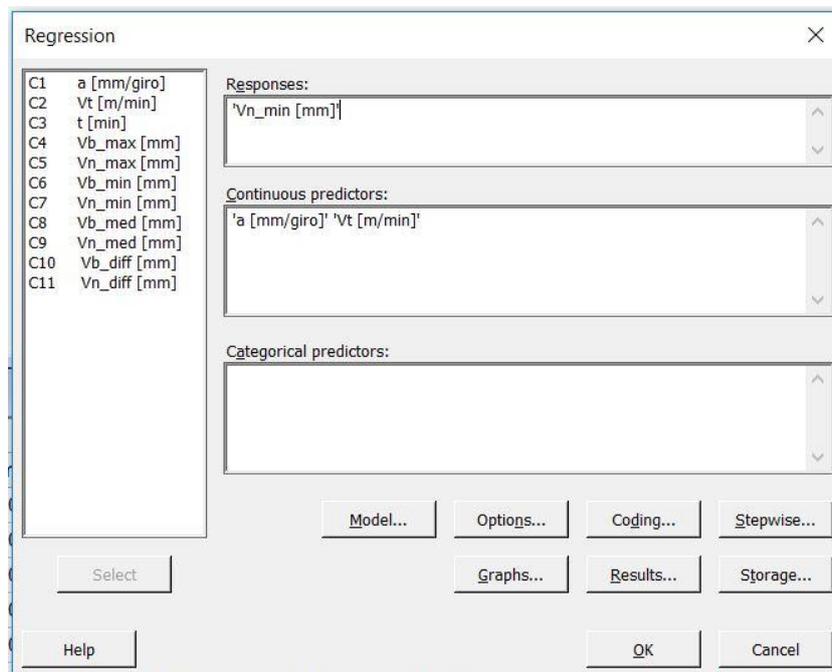


Figura 60. Scelta delle variabili su MINITAB.

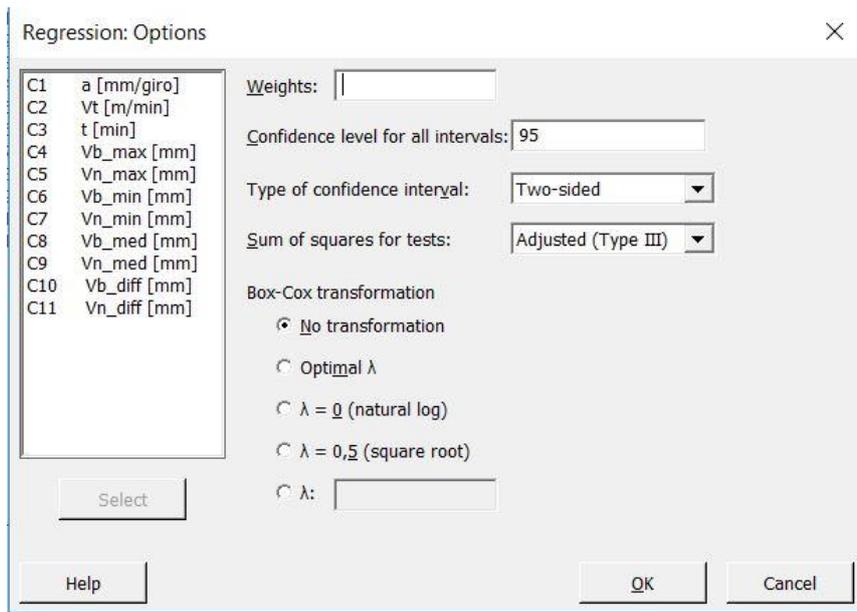


Figura 61. Scelta del livello di confidenza per gli intervalli.

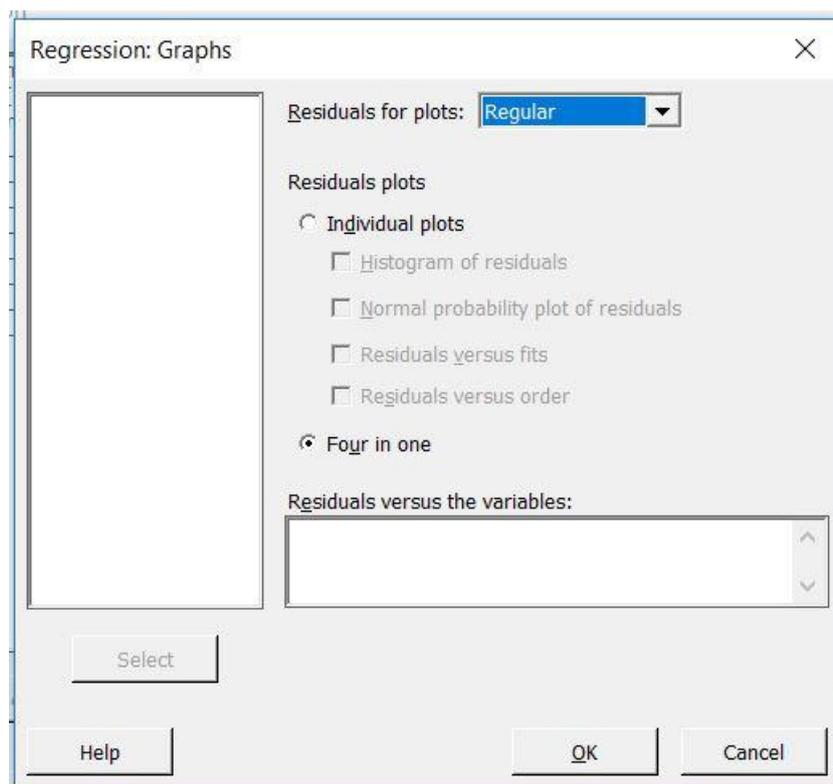


Figura 62. Scelta dei grafici da visualizzare.

9.1.2. Risultati analisi

Sono riportati solo quelli relativi a dati che hanno mostrato rilevanza statistica, per i restanti, nonostante siano stati oggetto di analisi, si è ritenuto opportuno non riportarli per non appesantire la trattazione.

Output di tale analisi:

Parte analitica

Regression Analysis: Vn_min [mm] versus a [mm/giro]; Vt [m/min]

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0,001252	0,000626	3,42	0,102
a [mm/giro]	1	0,000012	0,000012	0,07	0,804
Vt [m/min]	1	0,001242	0,001242	6,79	0,040
Error	6	0,001098	0,000183		
Total	8	0,002350			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0135265	53,29%	37,72%	0,00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,1457	0,0511	2,85	0,029	
a [mm/giro]	0,080	0,308	0,26	0,804	1,04
Vt [m/min]	-0,000910	0,000349	-2,61	0,040	1,04

Regression Equation

$$\text{Vn_min [mm]} = 0,1457 + 0,080 \text{ a [mm/giro]} - 0,000910 \text{ Vt [m/min]}$$

Figura 63. Residuo analitico da analisi di regressione lineare multipla.

Le valutazioni relative a tale parte analitica si dividono in più fasi:

Determinare se l'associazione tra la risposta e i termini è statisticamente significativa

Questa si fa comparando i *P-Value*, per il singolo termine, con il livello di significatività per valutare l'ipotesi nulla.

Tale ipotesi è quella che dice che non vi è alcuna associazione fra il termine e la risposta.

Di solito un livello di significatività (α) di 0.05 è abbastanza valido. Tale livello indica il 5% di rischio nel dire che una associazione esiste dove effettivamente non è così.

Si distinguono più casi. Se:

- $P\text{-Value} \leq \alpha$, l'associazione è statisticamente significativa, tra la variabile risposta ed il termine.
- $P\text{-Value} > \alpha$, l'associazione non è statisticamente significativa, bisognerebbe ri-adattare il modello senza tale termine.
- Nel caso di più variabili X senza rilevanza statistica con la risposta, si può ridurre il modello togliendo un termine alla volta.

Determinare quanto bene il modello si adatta ai dati, valutando le singole componenti

Questo si fa tramite l'*Analysis of variance* (analisi della varianza, *ANOVA*), dove si hanno:

- **DF** (Degrees of Freedom, gradi di libertà): pari al numero dei livelli (quindi dei valori) meno uno.
- **Adj SS**: incremento nella somma della regressione dei quadrati, comparata ad un modello solo con gli altri termini. Quantifica l'ammontare della variazione nei dati di risposta che è spiegata da ogni termine nel modello.
- **Adj MS**: misura la variazione di un termine nel modello, assumendo invariati tutti gli altri, indipendentemente dall'ordine col quale sono presenti in esso. Essa considera i gradi di libertà.
- **F-Value**: test statistico utilizzato per determinare se il termine è associato alla risposta.
- **P-Value**: indica la probabilità di ottenere un risultato uguale o "più estremo" di quello osservato, supposta vera l'ipotesi nulla. Chiamato anche livello di significatività osservato.

Model Summary (riassunto del modello), dove:

- **S**: rappresenta quando i valori dati si distanziano dai valori adattati. È misurata nelle unità della risposta. Esprime "quanto bene" il modello descrive la risposta. Più è basso, maggiore è la bontà della descrizione. Tuttavia, solo un valore basso di S , non indica che il modello centra le assunzioni fatte, poiché per verificare queste bisogna controllare il grafico dei residui.
- **R-sq**: percentuale di variazione nella risposta, che è spiegata nel modello. È calcolata come il complemento ad uno del rapporto tra l'errore della somma dei quadrati (che è la variazione non spiegata dal modello) e la somma totale dei quadrati (che è la variazione totale nel modello). Più è alto, migliore è l'adattamento del modello ai dati.
- **R-sq(adj)**: percentuale di variazione nella risposta, che è spiegata dal modello, aggiustata per il numero dei predittori nel modello, che è, a sua volta, relativo al numero delle osservazioni, per aiutare a scegliere il modello corretto. È calcolato come il complemento ad uno del rapporto fra l'errore quadratico medio (*Mean Square Error, MSE*) e l'errore quadratico totale (*Mean Square Total, MS Total*).
- **R-sq(pred)**: si calcola con una formula che è equivalente a rimuovere sistematicamente ogni osservazione dal set di dati, stimando l'equazione di regressione, e determinando quanto bene il modello predice l'osservazione rimossa. Si usa per determinare quanto bene il modello prevede la risposta per nuove osservazioni, più è alto, maggiore è la

capacità di previsione. Può essere più utile di quello aggiustato per comparare i modelli perché è calcolato con le osservazioni, che non sono incluse nel modello del calcolo.

Coefficients, dove:

- **Coef**: rappresentano i coefficienti dell'equazione di regressione.
- **SE Coef**: rappresenta l'errore standard del coefficiente. È il rapporto fra la deviazione standard e la radice del numero dei campioni.
- **VIF**: rapporto di inflazione della varianza. In un modello con termini multipli, è il rapporto della varianza diviso per la varianza di un modello con un singolo termine. Quantifica la severità della multicollinearità in un'ordinaria analisi di regressione ai minimi quadrati. Restituisce un indice che misura quanto la varianza di uno stimato coefficiente di regressione è aumentata a causa della multicollinearità.

Nello specifico caso occorre:

- a. **Determinare se l'associazione tra la risposta e i termini è statisticamente significativa**
 - Per la variabile Vt è inferiore al livello di confidenza pari al 5%, quindi l'associazione è statisticamente significativa, tra la variabile risposta e la Vt
 - Per la variabile a invece è superiore, quindi l'associazione non è statisticamente significativa, quindi bisogna riadattare il modello senza tale termine
- b. **Determinare quanto bene il modello si adatta ai dati, valutando le singole componenti**
 - **Adj SS**: incremento nella somma della regressione dei quadrati, comparata ad un modello solo con gli altri termini. Quantifica l'ammontare della variazione nei dati di risposta che è spiegata da ogni termine nel modello.
 - a , fa variare molto poco i dati della risposta
 - Vt , fa variare di più i dati della risposta rispetto a quella precedente
 - **F-Value**: test statistico utilizzato per determinare se il termine è associato alla risposta.
 - a , non è associato alla risposta (0.07)
 - Vt , è associato alla risposta (6.79)
 - Il numero dei campioni non è abbastanza ampio per provvedere ad una precisa stima della rilevanza della relazione. Questo perché le misure della rilevanza della relazione, rispettivamente *R-Squared* e *R-Squared (adjusted)*, possono variare molto. Quindi, per ottenere una stima più precisa, bisognerebbe utilizzare un numero superiore di campioni (di solito pari almeno a 40) per un modello di questo tipo (regressione lineare multipla)
 - Non vi sono dati non usuali. Questi possono avere una forte influenza sui risultati.
 - Avendo un campione di misure inferiore alle 15 unità, bisogna interpretare con cautela i *P-Values*, che discriminano in prima battuta la dipendenza dalla variabile risposta dalle relative variabili indipendenti. Questo perché, nel caso di piccoli campioni, l'accuratezza dei *P-Values* è sensibile agli errori residui non normali.

Parte grafica

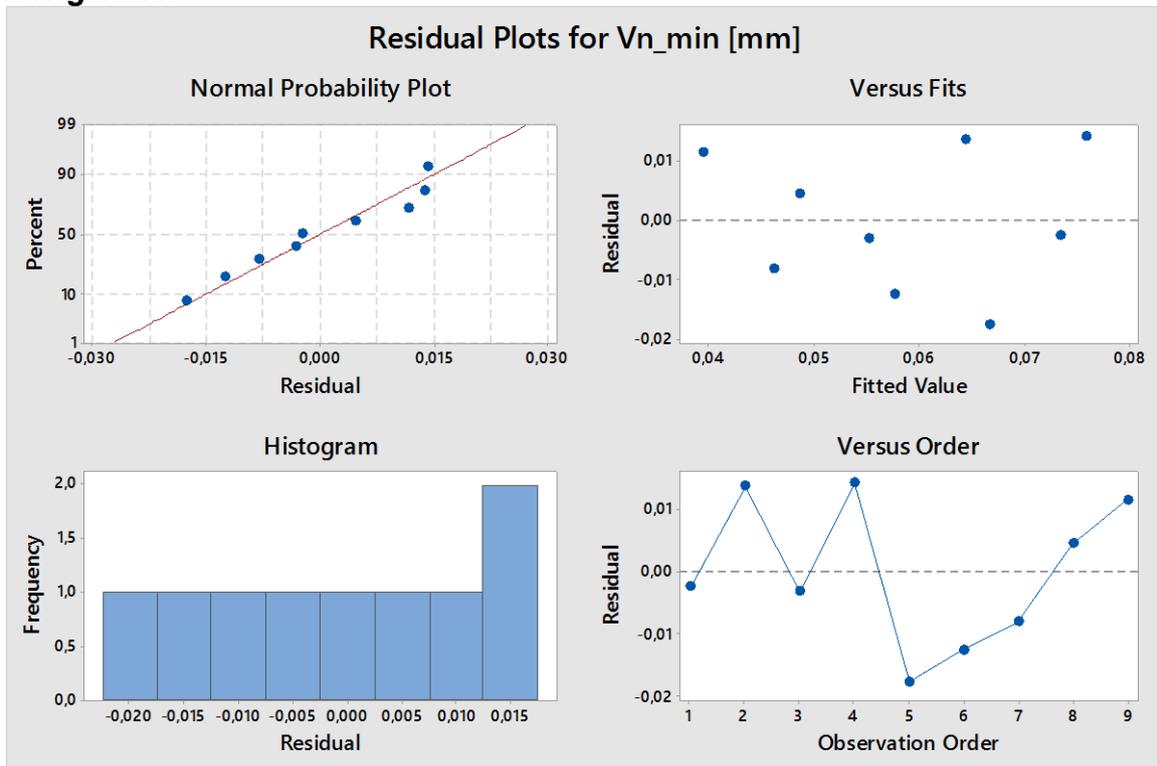


Figura 64. Differenti grafici dei residui.

Valutazioni da effettuare relativamente a tale parte grafica:

a. Determinare se il modello incontra le assunzioni dell'analisi

Per determinare se il modello è adeguato si utilizzano i grafici dei residui.

Se tali assunzioni non sono verificate, il modello potrebbe non approssimare correttamente i dati ed i risultati dovrebbero essere interpretati con cautela.

b. Residui contro adattati: per verificare l'ipotesi che i residui siano distribuiti casualmente e abbiano una varianza costante. Idealmente, i punti dovrebbero cadere casualmente su entrambi i lati dell'origine, senza schemi riconoscibili nei punti.

I modelli nella tabella seguente possono indicare che il modello non soddisfa i presupposti del modello:

Pattern	Cosa può indicare il pattern
Diffusione o diffusione disomogenea dei residui su valori adattati	Scostamento non costante
Curvilineo	Manca un termine di ordine superiore
Un punto che è lontano dallo zero	Un valore anomalo
Un punto che è lontano dagli altri punti nella direzione x	Un punto influente

Tabella 5. Pattern/andamenti osservabili nel grafico citato ed associazioni con eventuali cause.

- c. Residui contro ordine delle osservazioni:** per verificare l'ipotesi che i residui siano indipendenti l'uno dall'altro. Residui indipendenti non mostrano tendenze o pattern se visualizzati in ordine cronologico. I pattern nei punti possono indicare che i residui vicini tra loro possono essere correlati e quindi non indipendenti. Idealmente, i residui sulla trama dovrebbero cadere casualmente attorno alla linea centrale:

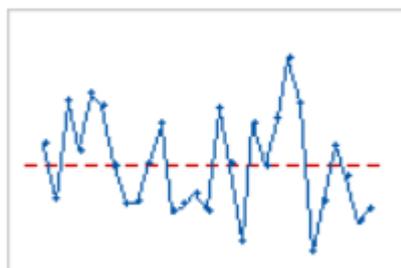


Figura 65. Andamento tipico.

Se viene rilevato un pattern, occorre investigarne la causa.

I seguenti tipi di modelli possono indicare che i residui sono dipendenti:

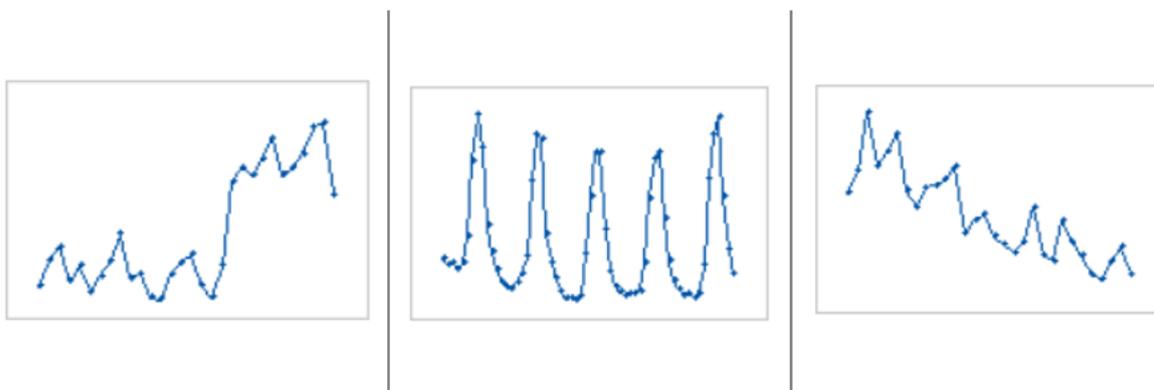


Figura 66. Pattern osservabili. Rispettivamente da sinistra verso destra: variazione o shift, ciclo, tendenza.

- d. Diagramma di probabilità normale dei residui:** per verificare l'ipotesi che i residui siano normalmente distribuiti. La normale trama di probabilità dei residui dovrebbe approssimativamente seguire una linea retta.

I modelli nella tabella seguente possono indicare che il modello non soddisfa i presupposti del modello.

Pattern	Cosa può indicare il pattern
Non una linea retta	Nonnormale
Un punto che è lontano dalla linea	Un outlier
Modifica della pendenza	Variabile non identificata

Tabella 6. Pattern/andamenti osservabili nel grafico citato ed associazioni con eventuali cause.

Commenti ai grafici:

Residui contro adattati

I residui sono distribuiti casualmente ed hanno una varianza costante (vuol dire che hanno uno scostamento non costante), ciò viene confermato anche dal fatto che i punti cadono casualmente su entrambi i lati dell'origine, senza trend o schemi particolari.

Residui contro ordine delle osservazioni

Non vi è la presenza di un pattern, quindi teoricamente i residui dovrebbero essere indipendenti l'uno dall'altro, poiché cadono casualmente attorno alla linea centrale.

Diagramma di probabilità normale dei residui

I residui sembrano normalmente distribuiti in quanto seguono approssimativamente una linea retta, quindi il modello soddisfa i presupposti fissati.

Andamenti bidimensionali e tridimensionali

Mappa 2D

Un grafico di contorno (mappa 2D) si usa per vedere come i valori adattati della risposta si riferiscono a due variabili continue basati sull'equazione di un modello. Esso fornisce una visione bidimensionale dove tutti i punti a pari risposta sono connessi in linee di contorno iso-risposta. Tali grafici sono utili per stabilire valori desiderabili di risposta e condizioni operative. Esso contiene i seguenti elementi:

- I predittori sugli assi x e y .
- Linee di contorno che connettono i punti che hanno lo stesso valore adattato della risposta.
- Bande di contorno colorate che rappresentano i ranges dei valori adattati della risposta.

Questo grafico può includere solo due variabili, se il modello ne include più di due, il software le fissa come costanti. Per realizzarlo non vengono utilizzati i dati dello spazio di lavoro, perché il software stima i contorni basandosi su un modello calcolato in precedenza a partire da questi. L'accuratezza del grafico dipende da quanto bene il modello rappresenta le relazioni tra le variabili.

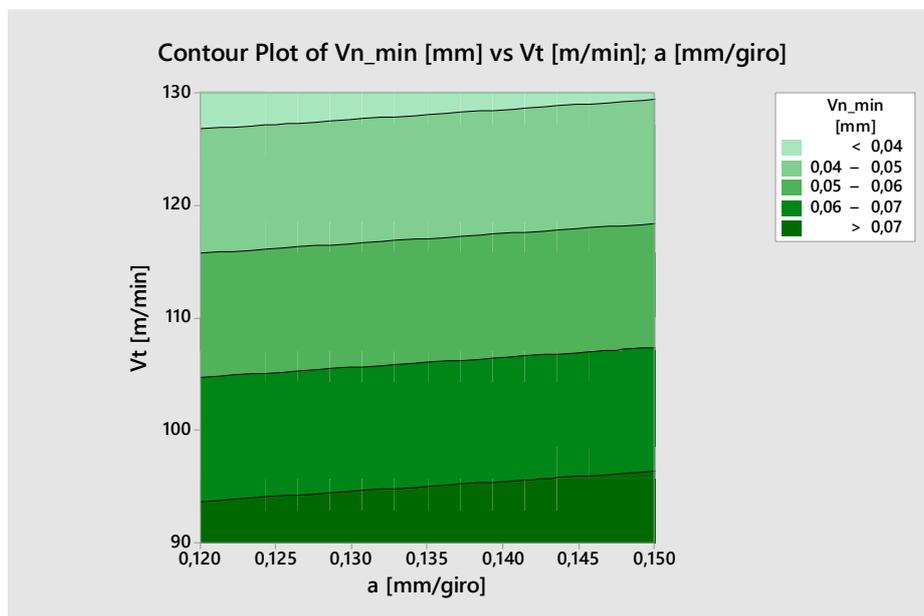


Figura 67. Grafico del contorno di Vn_{min} .

Commenti:

- I contorni sono rettilinei perché il modello contiene termini lineari che sono statisticamente significativi.
- Il valore più basso dell'usura Vn_{min} si registra nella zona alta del grafico, cui corrisponde il valore più elevato di $\bar{V}t$, quasi indipendentemente dal valore di a .
- Il valore più alto dell'usura Vn_{min} si registra nella zona bassa del grafico, cui corrisponde il valore più basso di $\bar{V}t$, quasi indipendentemente dal valore di a .
- Anche da tale rappresentazione si osserva la scarsa rilevanza della variabile a nel modello.

Mappa 3D

Un grafico di superficie (mappa 3D) si usa per vedere come i valori adattati della risposta si riferiscono a due variabili continue basati sull'equazione di un modello. Esso fornisce una visione tridimensionale utile per stabilire valori desiderabili di risposta e condizioni operative.

Esso contiene i seguenti elementi:

- I predittori sugli assi x e y .
- Una superficie continua, che rappresenta i valori della risposta adattati sull'asse z .

Questo grafico può includere solo due variabili, se il modello ne include più di due, il software le fissa come costanti.

Per realizzare tale superficie non si utilizzano i dati dello spazio di lavoro, perché il software stima i contorni basandosi su un modello calcolato in precedenza a partire da questi. L'accuratezza della superficie dipende da quanto bene il modello rappresenta le relazioni tra le variabili.

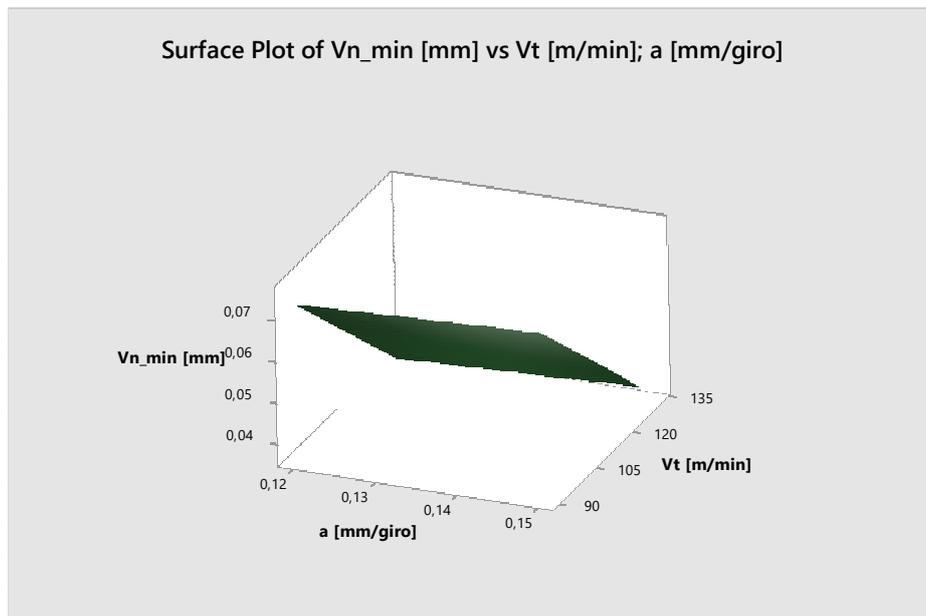


Figura 68. Grafico della superficie di Vn_min .

Commenti:

- La superficie della risposta è un piano perché il modello contiene termini lineari che sono statisticamente significativi.
- I valori più bassi di Vn_min si registrano per alti valori di Vt ed a , in basso a destra.
- I valori più alti di Vn_min si registrano per bassi valori di a e Vt , in alto a sinistra.
- Anche da tale rappresentazione si osserva la scarsa rilevanza della variabile a nel modello.

Seguono altri report realizzati tramite il medesimo software che permettono una interpretazione a maggiore impatto visivo dei risultati analitici sopra riportati.

Report di costruzione del modello

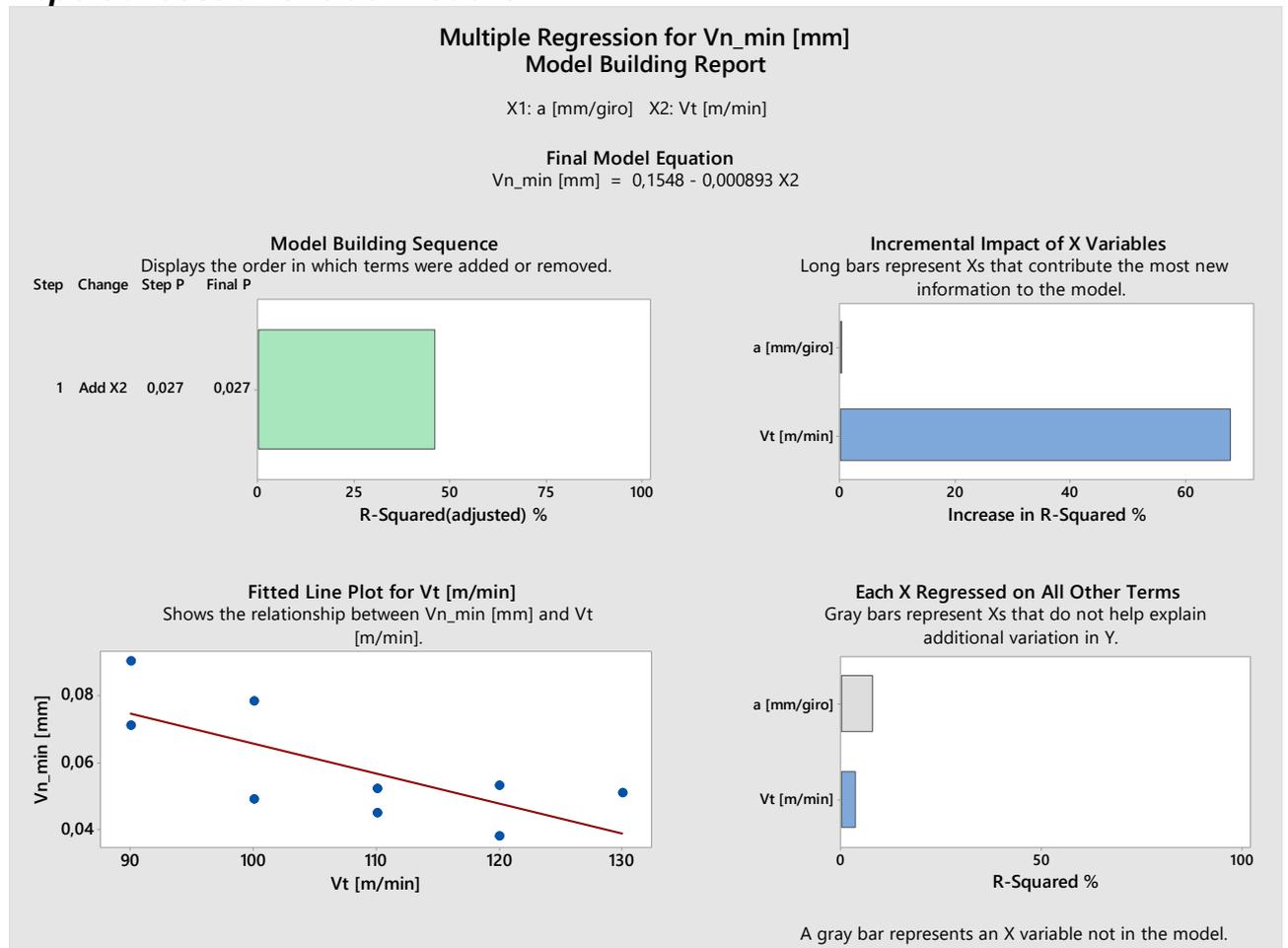


Figura 69. Regressione lineare multipla di Vn_min : report di costruzione del modello.

Dove si possono visualizzare:

- equazione finale del modello.
- sequenza di costruzione del modello (considerando le variabili aventi un P -Value inferiore al livello di confidenza settato, pari al 5%) in termini di R -Squared (adjusted), che mostra in l'ordine in cui i termini sono aggiunti o rimossi.
- impatto incrementale delle variabili indipendenti in termini di R -Squared %, dove si osserva che più è vasto l'incremento maggiore è il contributo della variabile al modello.
- linea che approssima il modello per la variabile a maggiore influenza, mostrando la relazione tra tale variabile e la variabile risposta.
- Altre variabili indipendenti presenti in termini di R -Squared %, dove sono individuabili con la barra grigia, quelle che non aiutano a spiegare variazioni addizionali nella variabile risposta.

Report sommario

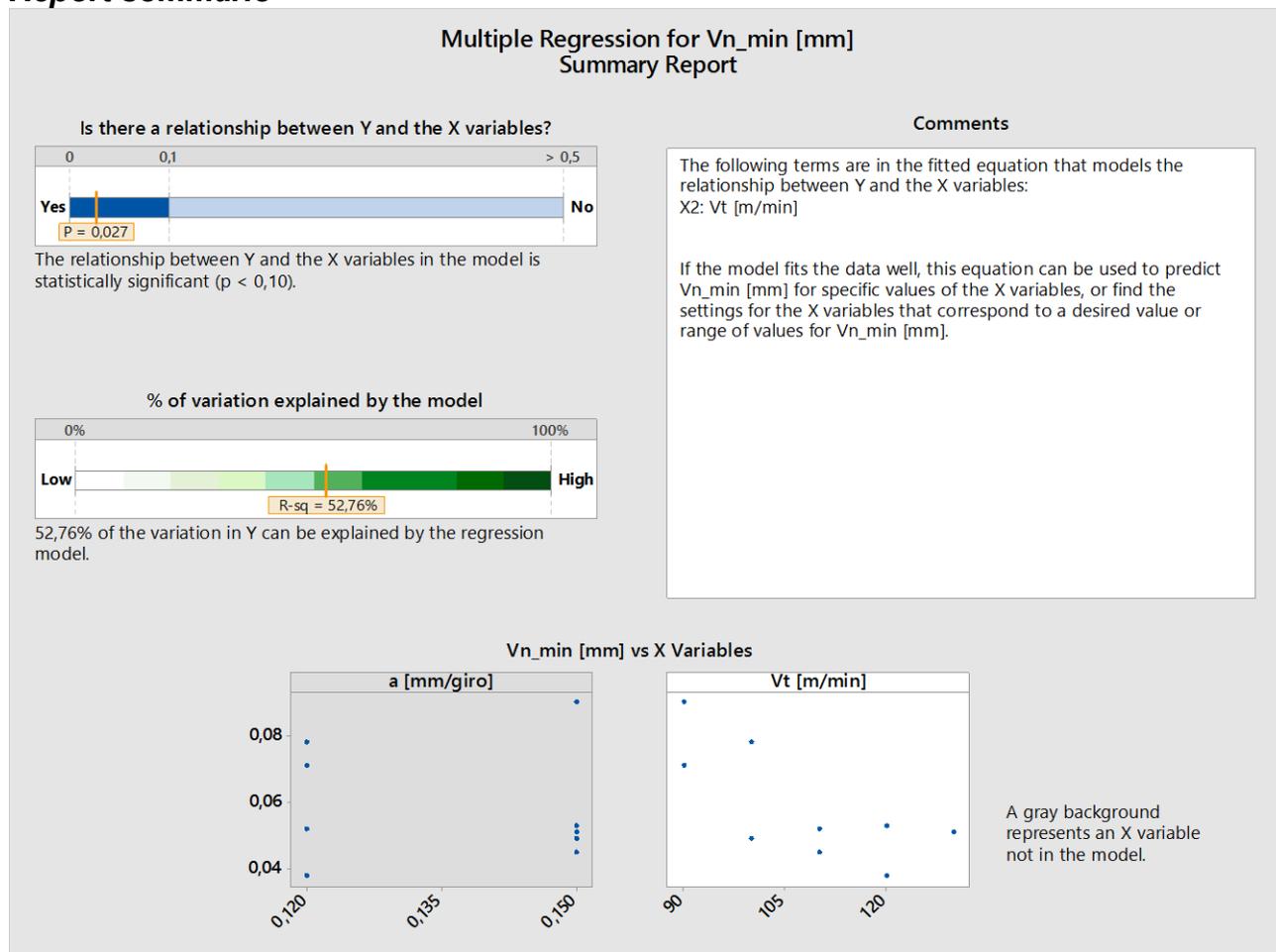


Figura 70. Regressione lineare multipla di Vn_{min} : report sommario.

Dove si può osservare:

- La presenza di una relazione tra la variabile Y e le X , l'unica variabile indipendente relazionata con la risposta è la velocità di taglio Vt .
- La percentuale di variazione espressa dal modello di regressione.
- La presenza o meno di una variabile nel modello, lo sfondo grigio rappresenta una variabile indipendente non nel modello.

Report di predizione ed ottimizzazione

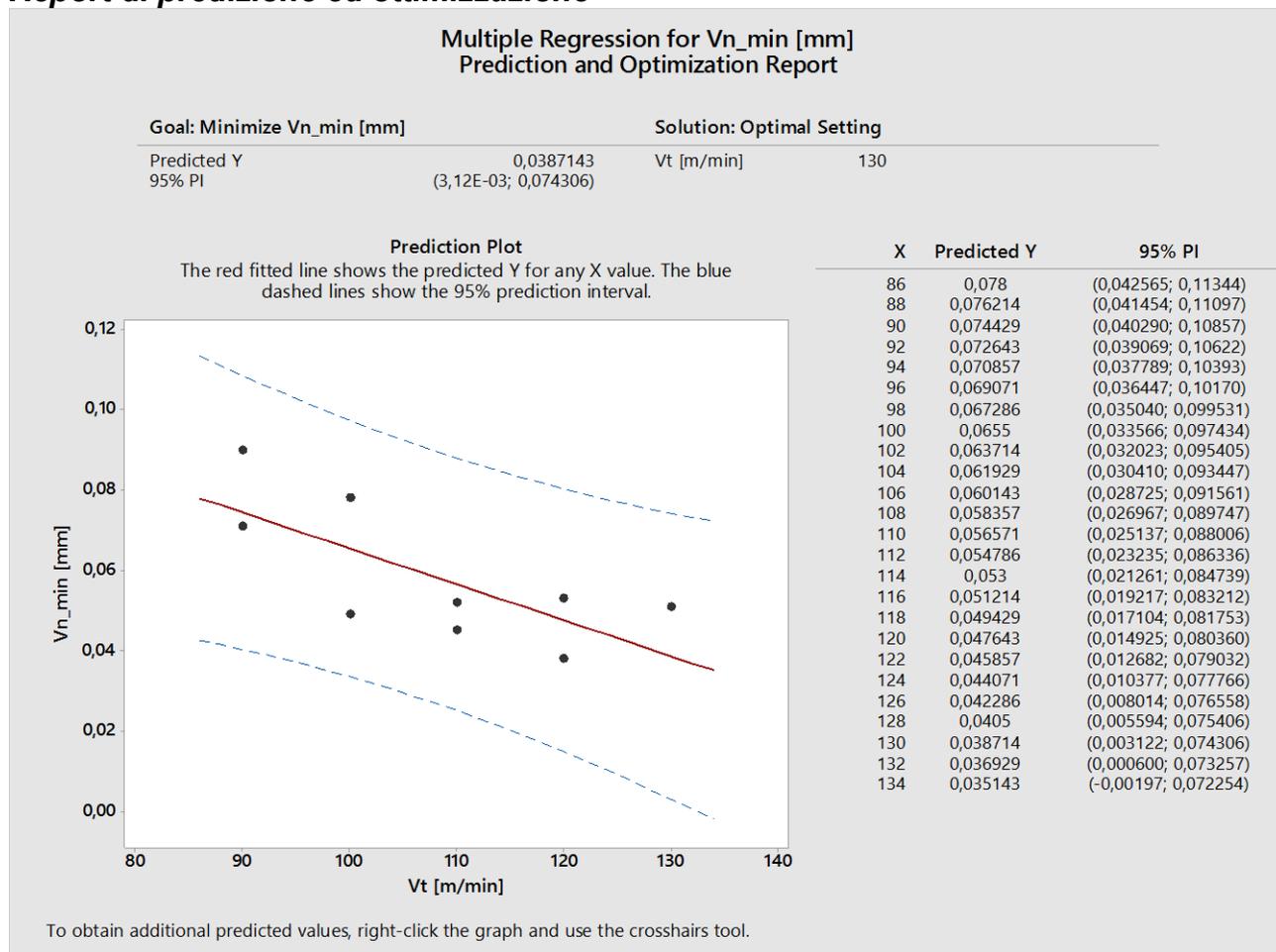


Figura 71. Regressione lineare multipla di Vn_min : report di predizione ed ottimizzazione.

Dove si può vedere:

- L'obiettivo dell'ottimizzazione, in questo caso la minimizzazione di Vn_min
- La soluzione ottimale per quanto riguarda il valore della variabile indipendente, $Vt=130$ m/min
- Un grafico della risposta in funzione della variabile indipendente, dove:
 - La linea rossa mostra la predizione di Y per ogni valore di X.
 - Le linee blu tratteggiate delimitano l'intervallo di predizione del 95%.

9.1.3. Ri-adattamento del modello

In seguito all'analisi svolta precedentemente, si è osservato che la variabile indipendente a non risulta relazionata con la risposta (non vi è associazione statistica), quindi si è deciso di ri-adattare il modello utilizzando la sola variabile Vt .

Parte analitica

Regression Analysis: Vn_min [mm] versus Vt [m/min]

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	0,001240	0,001240	7,82	0,027
Vt [m/min]	1	0,001240	0,001240	7,82	0,027
Error	7	0,001110	0,000159		
Lack-of-Fit	3	0,000372	0,000124	0,67	0,612
Pure Error	4	0,000738	0,000184		
Total	8	0,002350			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0125933	52,76%	46,02%	15,46%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,1548	0,0347	4,46	0,003	
Vt [m/min]	-0,000893	0,000319	-2,80	0,027	1,00

Regression Equation

$$Vn_min [mm] = 0,1548 - 0,000893 Vt [m/min]$$

Figura 72. Residuo analitico da analisi di regressione lineare semplice.

Parte grafica

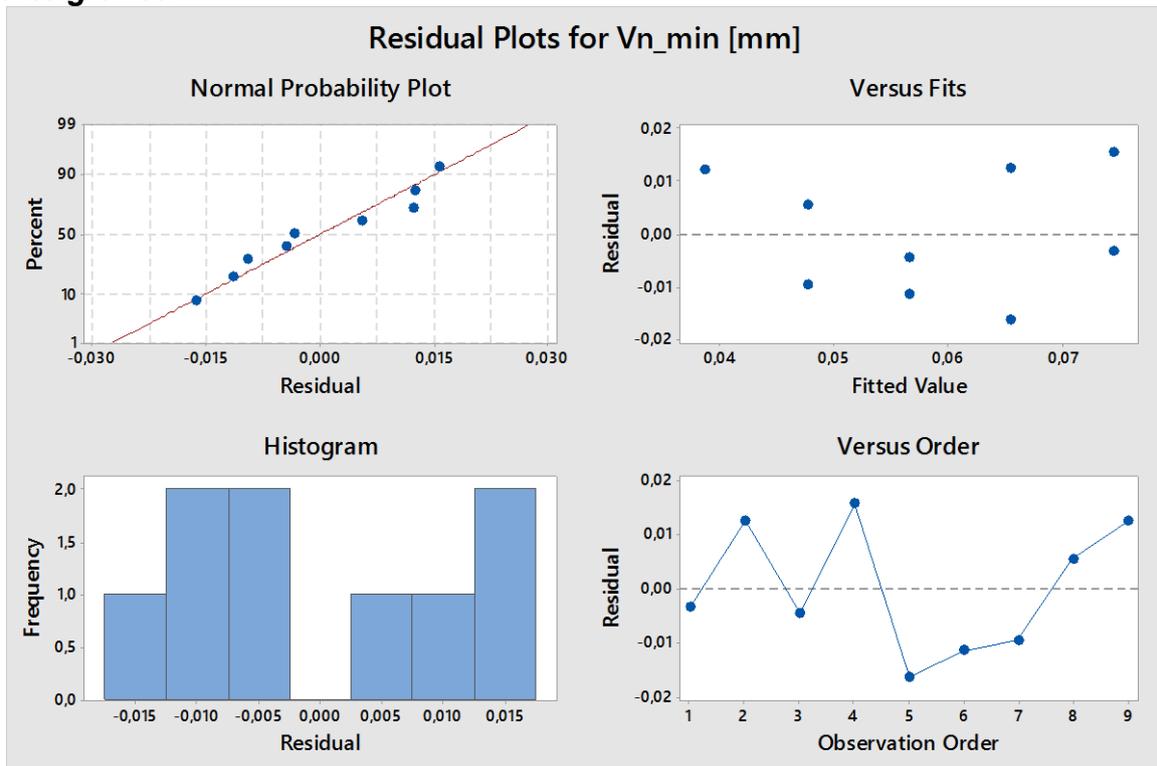


Figura 73. Differenti grafici dei residui.

Osservazioni sul ri-adattamento

A livello di parte analitica e grafica, valgono le stesse considerazioni svolte precedentemente, eccezion fatta per la significatività delle variabili in gioco, poiché, essendo stata esclusa quella non significativa, non sono stati riscontrati problemi a tal proposito.

Anche in questo caso seguono altri report realizzati tramite il medesimo software che permettono una interpretazione a maggiore impatto visivo dei risultati analitici sopra riportati.

Report di predizione

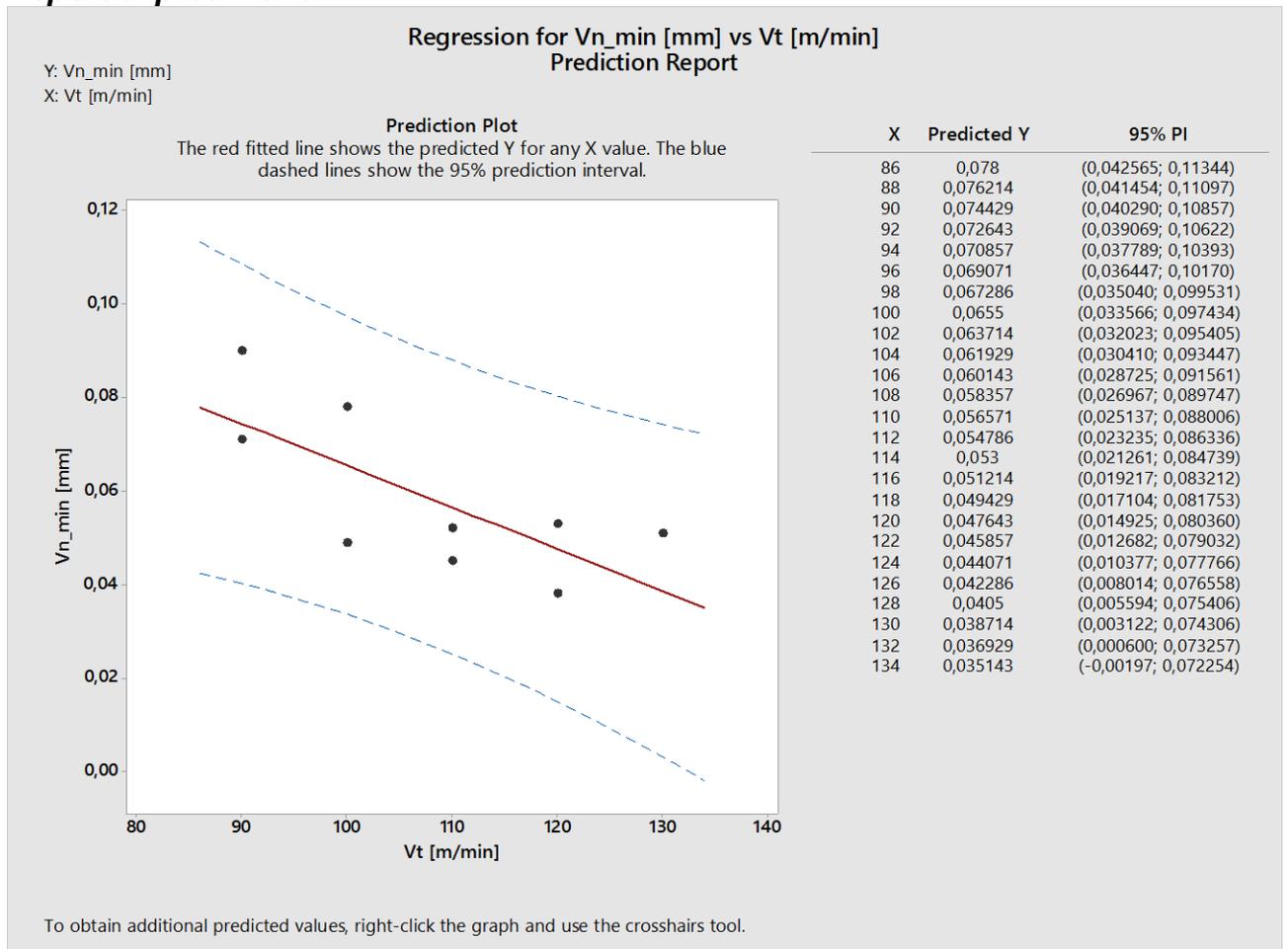


Figura 74. Regressione lineare di Vn_min : grafico di predizione.

Dove si può vedere:

- Un grafico della risposta in funzione della variabile indipendente, dove:
 - La linea rossa mostra la predizione di Y per ogni valore di X .
 - Le linee blu tratteggiate delimitano l'intervallo di predizione del 95%.
 - I punti sperimentali si dispongono random attorno alla retta di predizione.

Report di selezione del modello

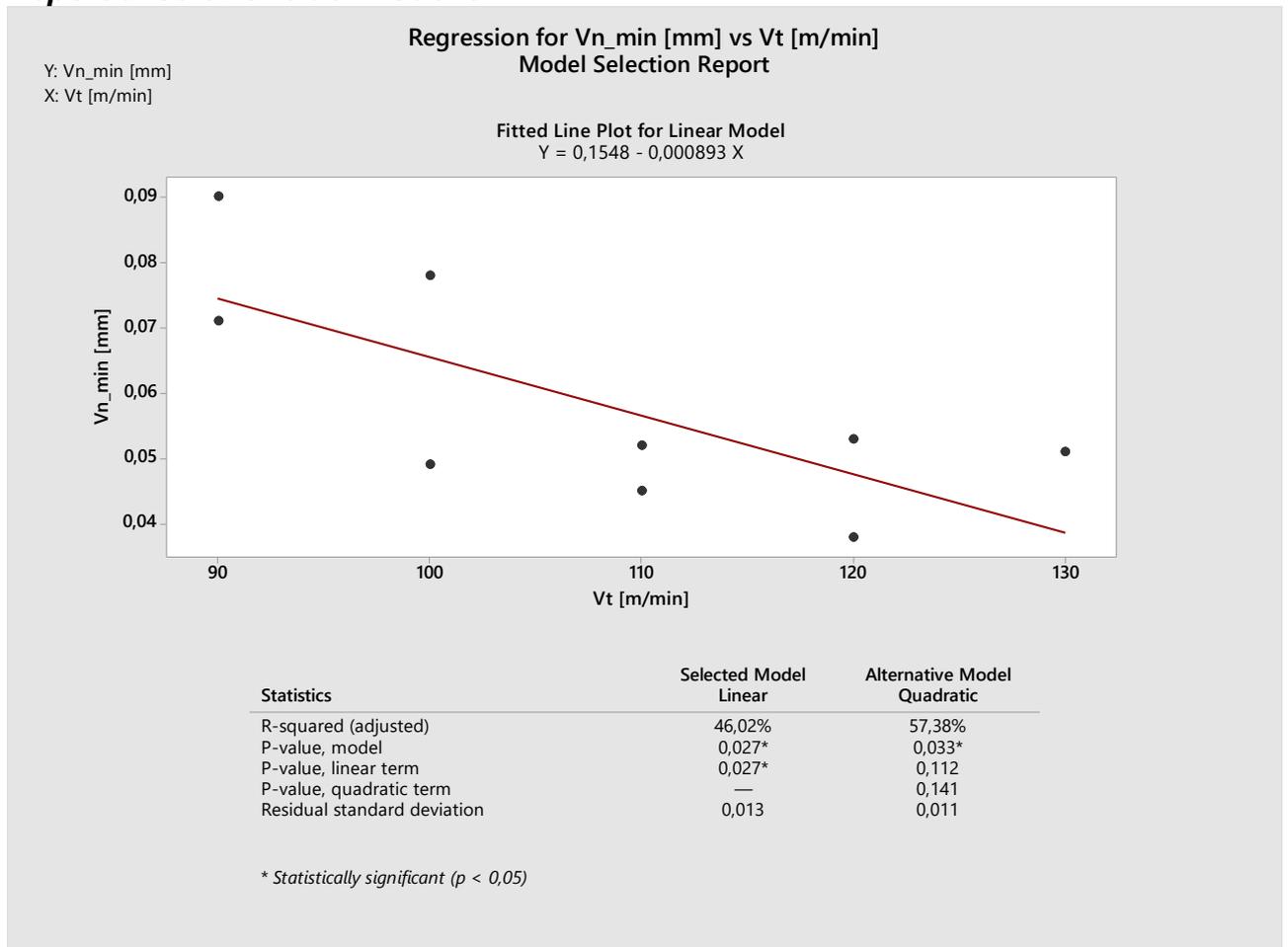


Figura 75. Regressione lineare di Vn_min : report di selezione del modello.

Dove si può vedere:

- L'equazione finale del modello.
- La dispersione random dei punti attorno alla retta di adattamento espressa da tale equazione.
- I valori dei *P-Value* e *R-squared* per il modello lineare selezionato ed un alternativo quadratico, dove si osserva che:
 - Il modello lineare è statisticamente significativo.
 - Quello quadratico no.

Report sommario

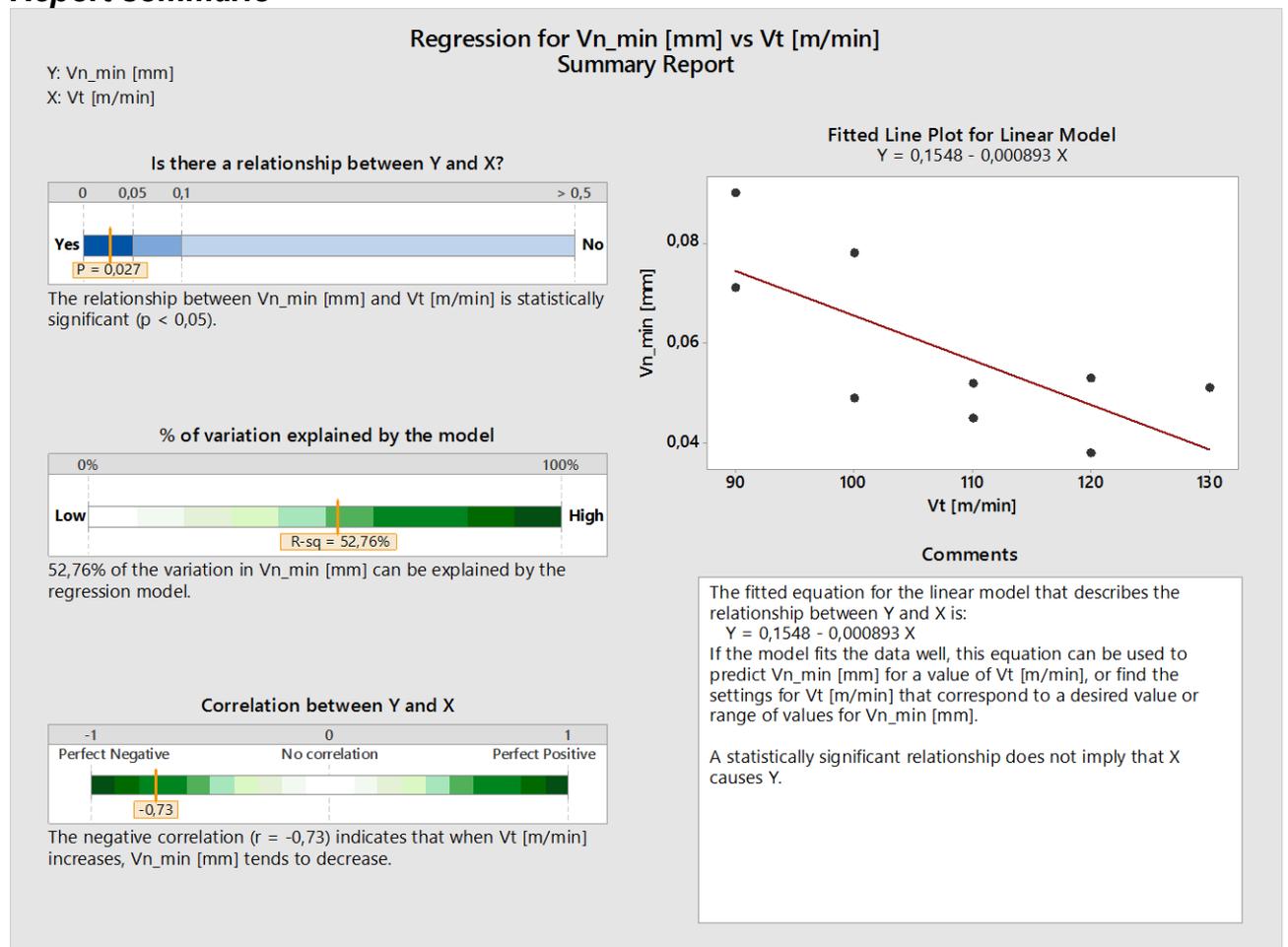


Figura 76. Regressione lineare di Vn_min : report sommario.

Dove si può osservare:

- La presenza di una relazione tra la variabile Y e le X (Vt).
- La percentuale di variazione espressa dal modello di regressione.
- La correlazione tra la Y e la X , che essendo negativa (da cui la pendenza negativa della retta di regressione), quando Vt aumenta, Vn_min tende a diminuire.
- L'equazione di regressione e relativa rappresentazione.
- Il fatto di avere rilevanza statistica, non vuol dire che X implica Y .

Ulteriore commento ai risultati ottenuti dall'analisi

I valori dell'usura sono stati quantificati, per selezione di punti estremi manualmente, con il post processamento delle immagini realizzate con un microscopio digitale, quindi non si può escludere l'eventuale presenza di errori nella misura legati a tale motivo.

Avendo svolto una sola prova per set di parametri non si è riusciti a confermare l'attendibilità di tali valori rilevati.

Come già accennato in precedenza, risulta che la scarsa numerosità di punti non permette di effettuare una valutazione corretta per quanto riguarda l'analisi di regressione, quindi la validità di tale modello, pur essendo statisticamente significativo, è estendibile alle sole prove effettuate.

10. Analisi dimensionale

Prima di provvedere all'estensione dei parametri ad un numero superiore di campioni, si è effettuata una analisi statistica sulle dimensioni geometriche influenzate dalla variazione dei parametri impostata, al fine di valutare l'influenza di questi sulle superfici lavorate nella fase oggetto di studio.

All'interno di questa sono stati confrontati i risultati ottenuti nelle prove variando i parametri con uno storico precedente, ottenuto utilizzando solo i parametri di partenza.

Tale analisi è stata effettuata mediante l'ausilio di carte di controllo di due differenti tipi a causa del fatto che per la quantificazione dimensionale di alcuni parametri viene effettuata tramite una rilevazione su più punti diversi tra loro.

Le tipologie di carte di controllo utilizzate sono:

- *Xbar-R Chart*, per le variabili geometriche misurate su più punti.
- *I-MR Chart*, per le variabili geometriche misurate in un singolo punto.

Di seguito sono presenti alcune considerazioni più pratiche al fine di favorire l'analisi del processo tramite lo strumento delle carte di controllo, realizzate con l'ausilio del software statistico *MINITAB*.

10.1. *Xbar-R Chart*

Si usa per monitorare la media e la deviazione standard di un processo quando si hanno dati continui e sottogruppi di dimensioni pari ad 8 o inferiori. Si usa per monitorare la stabilità di un processo nel tempo. Ad esempio:

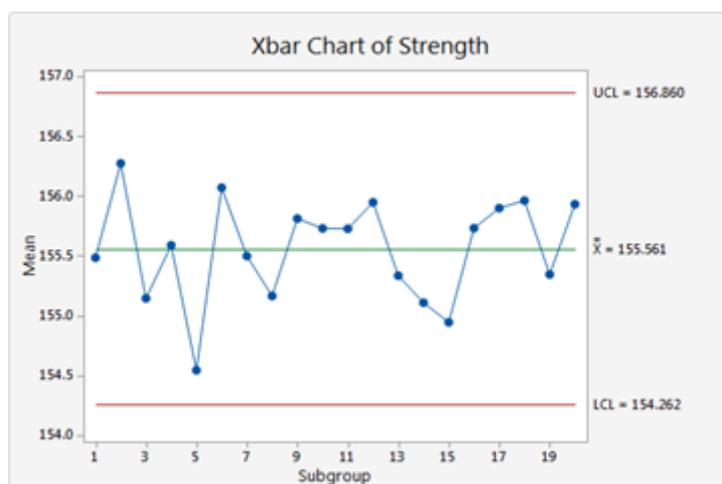


Figura 77. Esempio di *Xbar Chart*.

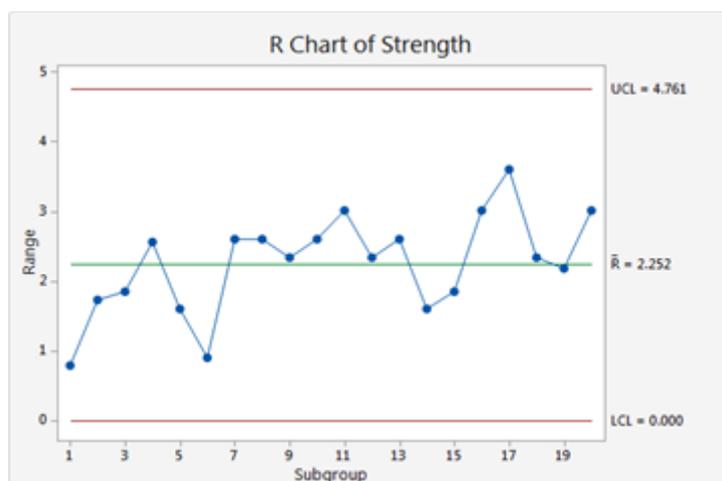


Figura 78. Esempio di *R-Chart*.

Per sottogruppi di dimensione pari a 9 o più si utilizza l'*Xbar-S Chart* (non trattato in questo studio). Se invece non si hanno sottogruppi, si utilizza *I-MR Chart* (trattato di seguito).

Per valutare ed essere sicuri della validità dei dati, occorre considerare le seguenti linee guida durante la fase di raccolta, esecuzione delle analisi ed interpretazione dei risultati. I dati:

- devono essere continui;
- devono essere in ordine temporale, perché l'obiettivo delle carte di controllo è determinare cambiamenti nel tempo;
- devono essere rilevati ad appropriati intervalli temporali;
- devono essere suddivisi in sottogruppi razionali (un sottogruppo razionale è un piccolo insieme di campioni simili, che sono prodotti in un breve periodo di tempo sotto le stesse condizioni e sono rappresentativi dell'output di un processo. Se i sottogruppi non sono razionali i limiti di controllo stimati potrebbero essere troppo ampi);
- dovrebbero essere divisi in sottogruppi fatti da 8 o meno osservazioni;
- dovrebbero includere almeno 100 osservazioni totali tra tutti i sottogruppi. Nel caso in cui non fosse così, si può usare ancora la carta di controllo ma i suoi limiti potrebbero non essere precisi;
- su cui sono svolte le osservazioni, per ogni sottogruppo tali osservazioni non dovrebbero essere correlate con le altre degli altri sottogruppi.

10.1.1. Interpretazione dei risultati

Esaminare il *R-Chart* per determinare se la variazione del processo in controllo.

Si fa prima di guardare l'*Xbar Chart*. Se questo non è in controllo, i limiti di controllo sul *Xbar Chart* non sono accurati. L'*R-Chart* rappresenta il range dei sottogruppi, la linea centrale è la media dei range dei sottogruppi, ed i limiti di controllo sono settati ad una distanza di 3 deviazioni standard sopra e sotto la linea centrale, che identificano la variazione attesa nei range dei sottogruppi.

I punti rossi indicano i sottogruppi in cui si è avuto il fallimento dei test per cause speciali e non sono in controllo. Bisognerebbe investigare tali punti, poiché potrebbero influenzare la stima dei parametri di processo e di controllo del processo stesso. Se questi sono dovuti a cause speciali si può considerare di ometterli dal calcolo.

2. Esaminare l'*Xbar Chart* per determinare se la media del processo è in controllo.

Esso rappresenta l'andamento della media delle misure entro ogni sottogruppo. La linea centrale è la media delle medie dei sottogruppi, anche qui i limiti di controllo sono settati a 3 deviazioni standard sopra e sotto la linea centrale, rappresentando la quantità di variazione attesa degli elementi dei sottogruppi.

Per i punti rossi valgono le considerazioni fatte precedentemente.

10.2. *I-MR Chart*

Si usa per monitorare la media e la variazione del processo quando si hanno dati continui ed osservazioni individuali non divise in sottogruppi, per valutare la stabilità nel del processo nel tempo.

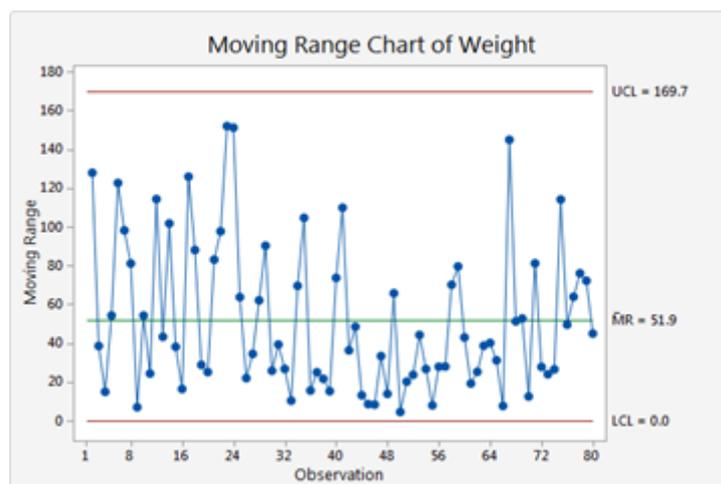


Figura 79. Esempio di *I-MR Chart*.

10.2.1. Interpretazione dei risultati

Esaminare l'*MR-Chart* per determinare se la variazione del processo in controllo.

Prima di guardare l'andamento degli individuali, bisogna valutare quello del range mobile per determinare se la variazione del processo è in controllo, poiché se non lo è i limiti di controllo sul grafico degli individuali non sono accurati.

L'*MR-Chart* rappresenta l'andamento del range mobile (la differenza, in valore assoluto, tra due o più punti consecutivi), la linea centrale è la media di tutti i range mobili, ed i limiti di controllo, come nei casi sopra citati, sono dettati ad una distanza di 3 deviazioni standard sopra e sotto la linea centrale, esibendo la variazione attesa nel range mobile dei dati rilevati.

Anche in questo caso, i punti rossi indicano situazioni che falliscono almeno un test per cause speciali e non sono in controllo. Ad ogni modo, conviene investigarli perché possono influenzare la stima dei parametri di processo e di controllo, non permettendone una corretta rappresentazione.

2. Esaminare l'*I-Chart* per determinare se il processo è in controllo.

L'*I-Chart*, invece, rappresenta l'andamento delle osservazioni individuali. La linea centrale è il valor medio delle osservazioni, anche qui i limiti di controllo sono settati a 3 deviazioni standard sopra e sotto la linea centrale, rappresentando la quantità di variazione attesa degli elementi dei sottogruppi.

Per i punti rossi valgono le considerazioni fatte precedentemente.

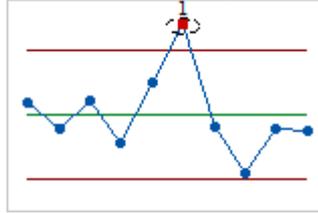
10.3. Interpretazione della statistica e di grafici

Se il processo è in controllo i punti variano in maniera casuale intorno alla linea centrale, esibendo solo cause di variazione comuni, in ogni caso bisogna investigare i punti che cadono fuori dai limiti di controllo o andamenti anormali per cause di variazione speciali.

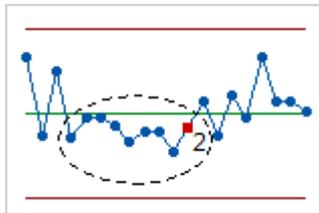
I limiti di controllo sono le linee, sopra e sotto, la linea centrale ed indicano se un processo è in controllo o meno. Sono basati sulla variazione tra i sottogruppi e sulla variazione attesa nei diversi punti. Questi sono diversi dai limiti specifici, che sono dati dalle richieste del cliente ed indicano la quantità di variazione che si vuole vedere nel processo, invece limiti di controllo rappresentano l'attuale variazione nei dati.

10.3.1. test per cause speciali, presenza di:

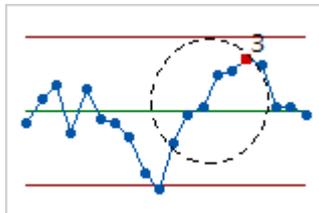
- un punto a più di 3σ dalla linea centrale, per identificare i fuori controllo



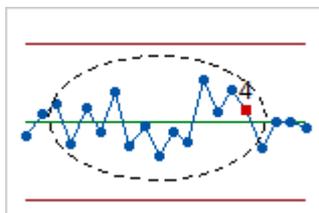
- 9 punti consecutivi dallo stesso lato rispetto alla linea centrale, per identificare uno shift



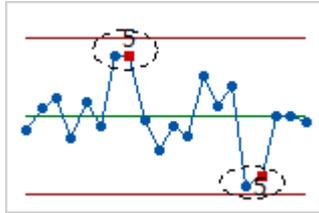
- 6 punti consecutivi tutti crescenti o decrescenti, per identificare un trend



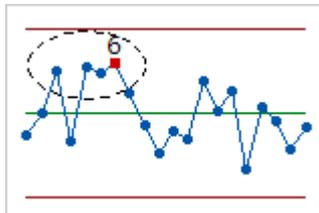
- 14 punti consecutivi alternati sopra e sotto la linea centrale, per identificare una variazione sistematica



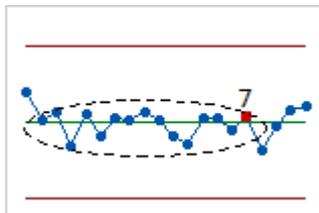
- 2 su 3 punti consecutivi a più di 2σ dalla linea centrale e presenti sullo stesso lato



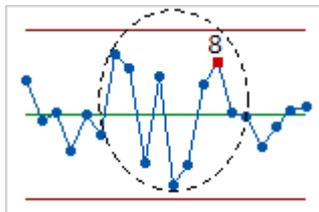
- 4 su 5 punti consecutivi più lontani di σ dalla linea centrale e presenti sullo stesso lato



- 15 punti consecutivi intorno alla linea centrale



- 8 punti consecutivi a più di sigma dalla linea centrale, indipendentemente dal lato



10.4. *Analisi e considerazioni*

La stessa analisi è stata svolta due volte a causa del fatto che alcune prove sono state svolte su di un componente, mentre altre sono state svolte sull'altro, quindi per effettuare una relazione con lo storico dati occorre contestualizzare ognuno dei due nel suo relativo.

10.4.1. Componente A

Xbar-R Chart della concentricità del foro

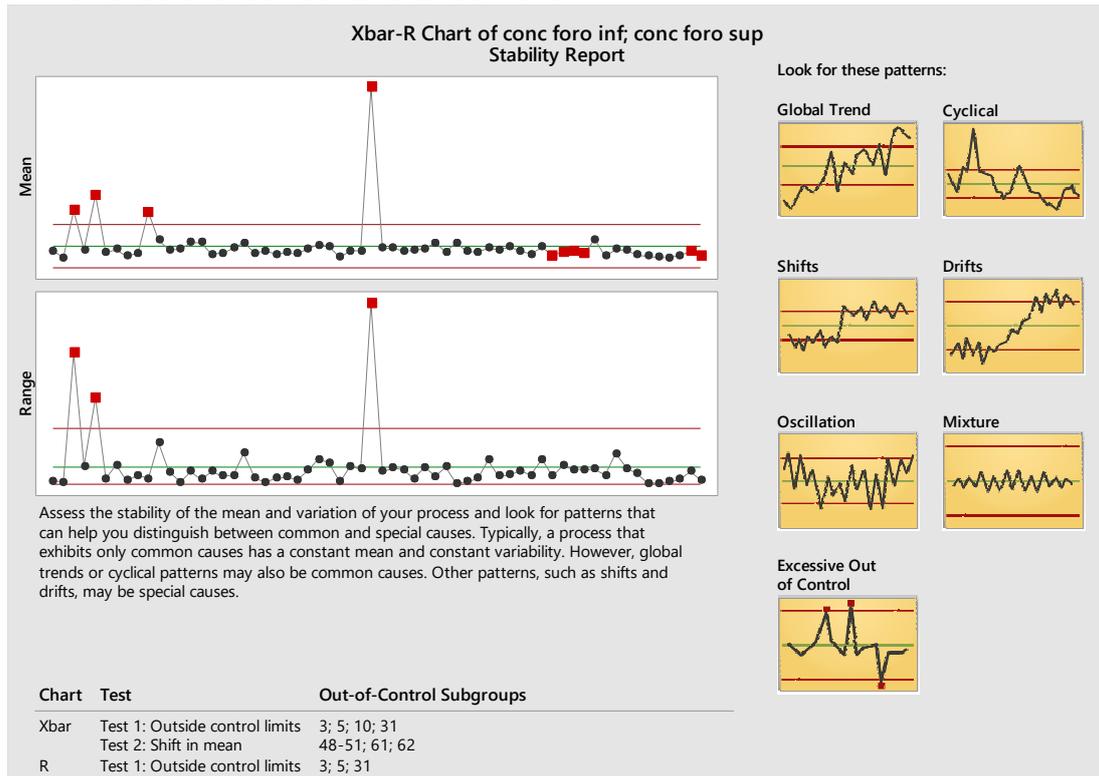


Figura 80. *Xbar-R Chart* della concentricità del foro: report di stabilità.

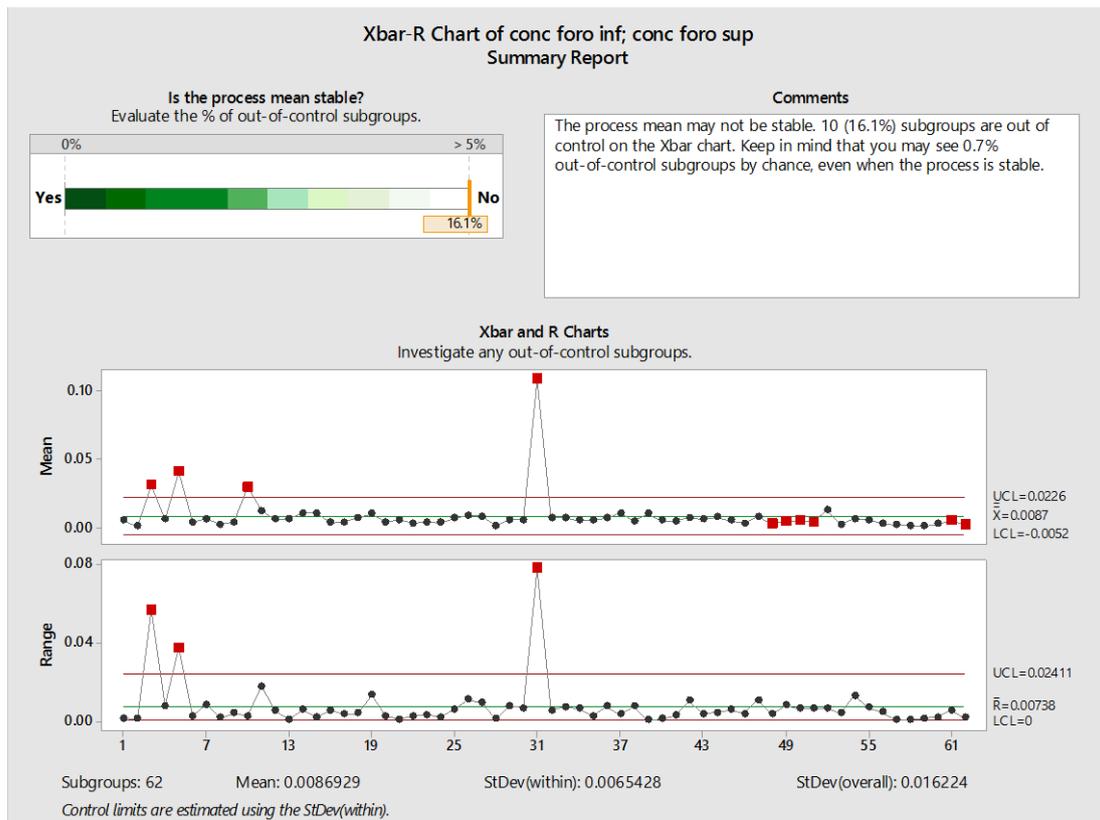


Figura 81. *Xbar-R Chart* della concentricità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 10 sottogruppi (16.1%) sono fuori controllo sull'*Xbar Chart*, 3 sottogruppi (4.8%) sono fuori controllo sull'*R Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*Xbar Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di sottogruppi fuori controllo sull'*Xbar Chart* e 0.9% di sottogruppi fuori controllo sull'*R Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test sulla quantità dei dati

Non occorre preoccuparsi circa la precisione dei limiti di controllo perché il numero dei punti inclusi nel calcolo è superiore al valore consigliato (100).

Test sulla correlazione dei dati

C'è un moderato grado di correlazione ($r=0.6$) tra dati consecutivi entro ciascun sottogruppo. Si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della conicità del foro

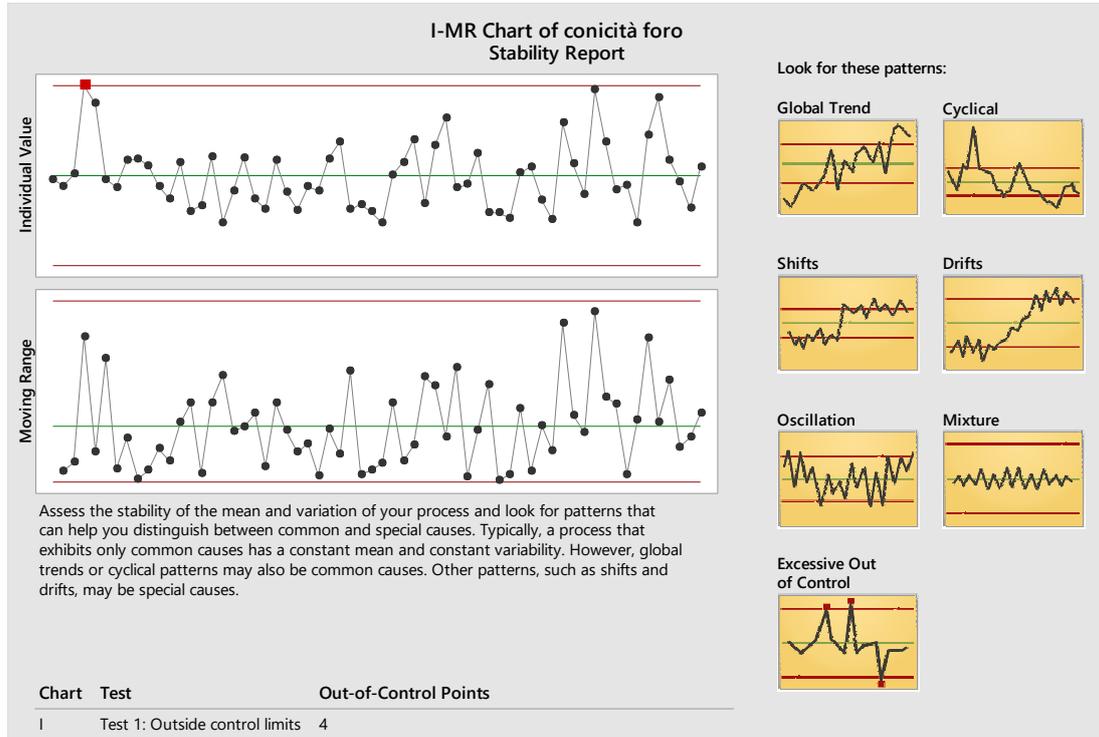


Figura 82. *I-MR Chart* della conicità del foro: report di stabilità.

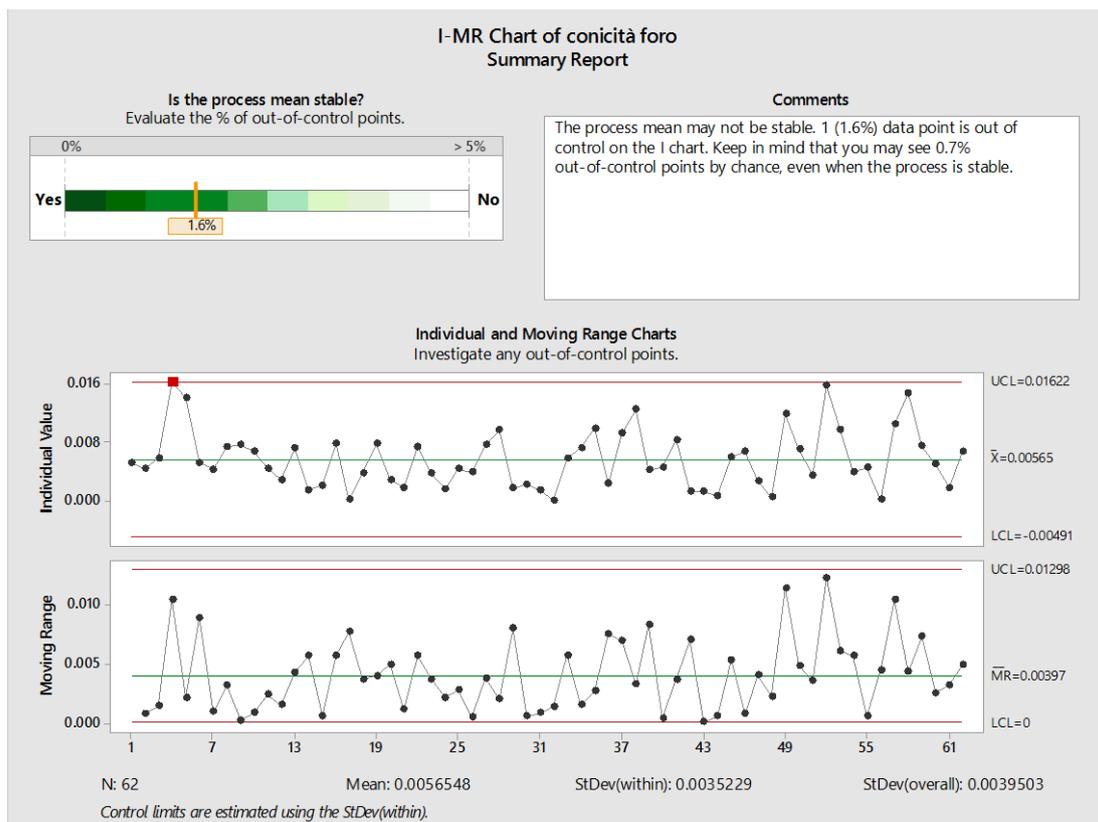


Figura 83. *I-MR Chart* della conicità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La variazione del processo è stabile. Non vi sono punti fuori controllo sull'*MR Chart*. Tuttavia, la media del processo non potrebbe essere stabile perché un punto (pari all'*1.6%*) è fuori controllo sull'*I Chart* (Si dovrebbero avere *0.7%* di sottogruppi fuori controllo occasionalmente, anche quando il processo è stabile).

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

In caso di presenza di dati non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Siccome meno del *2%* dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (*100*), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di correlazione.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart del diametro dell'alesatura inferiore

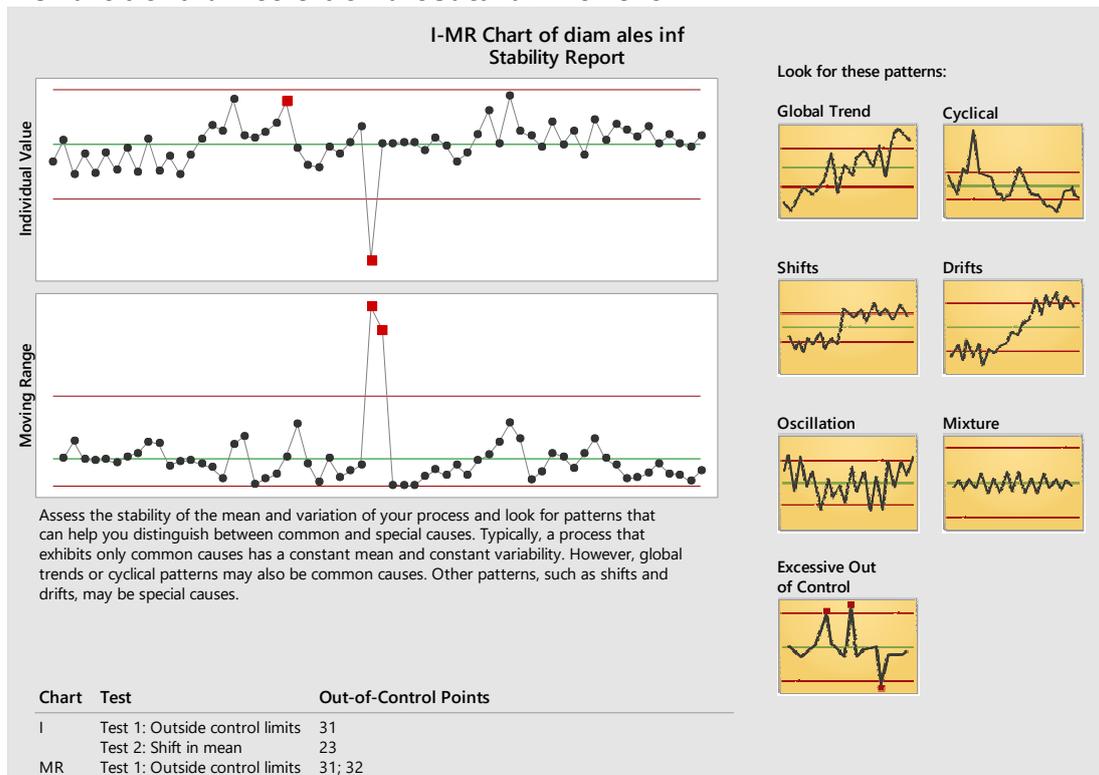


Figura 84. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura inferiore: report di stabilità.

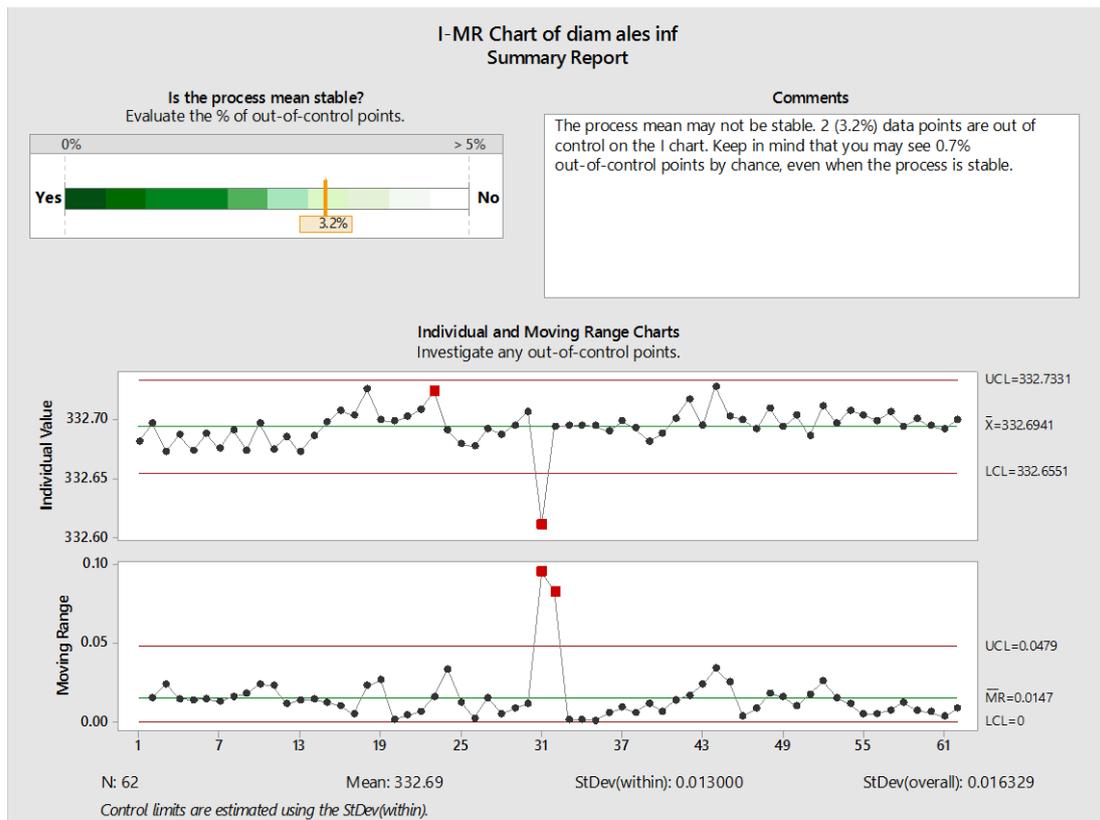


Figura 85. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura inferiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 2 punti (3.2%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

In caso di presenza di dati non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di correlazione.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart del diametro dell'alesatura superiore

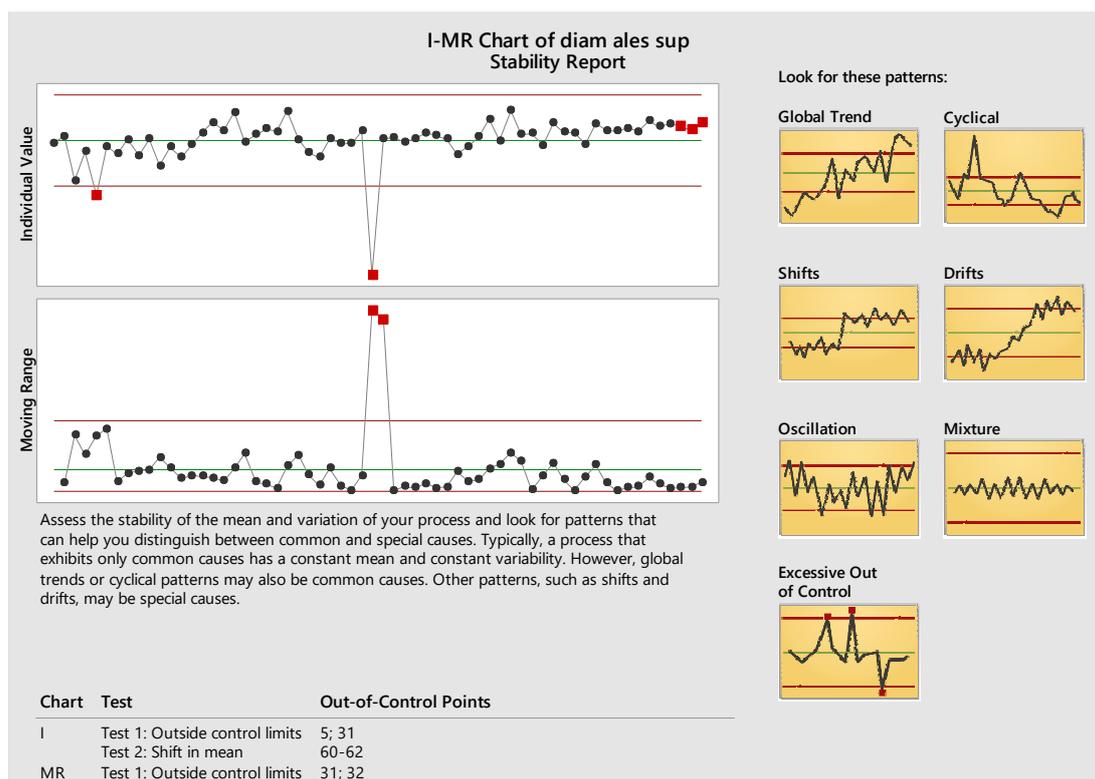


Figura 86. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura superiore: report di stabilità.

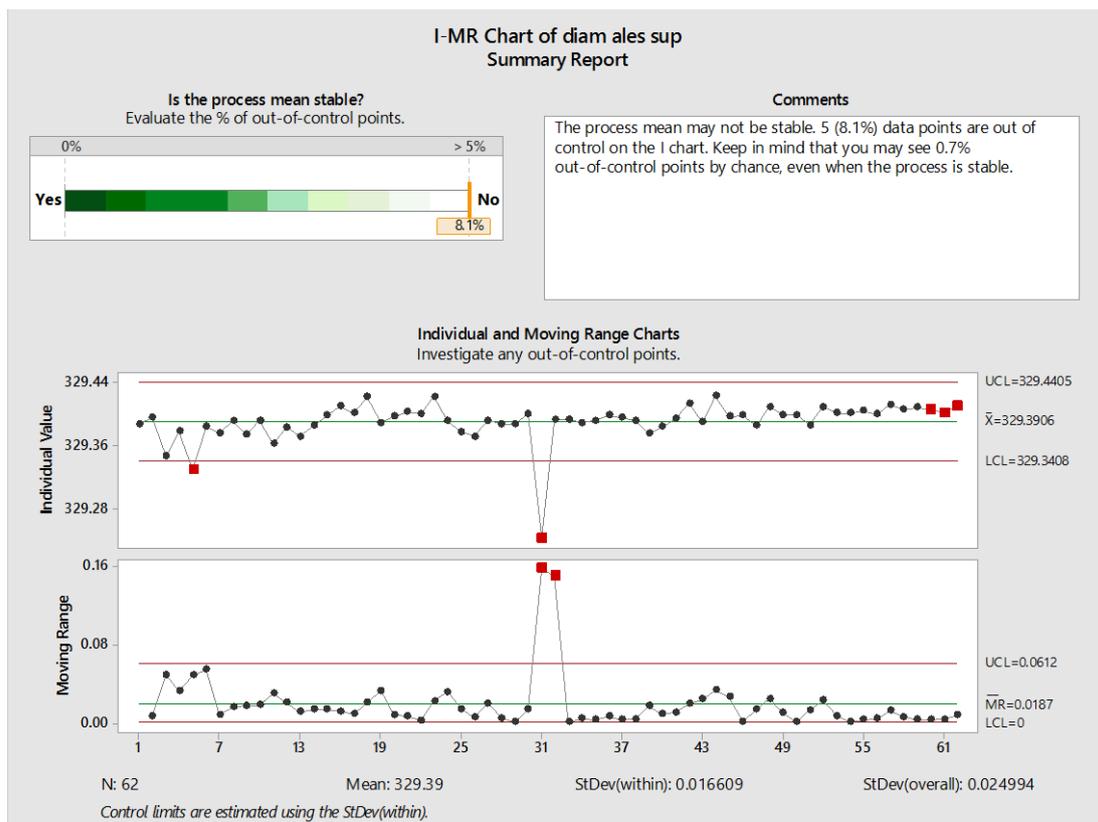


Figura 87. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura superiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 5 punti (8.1%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

I dati hanno fallito tale test, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che la correlazione tra due punti successivi è inferiore a 0.2, i dati hanno passato tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento differente rispetto allo storico, a causa delle variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

Xbar-R Chart del diametro del foro

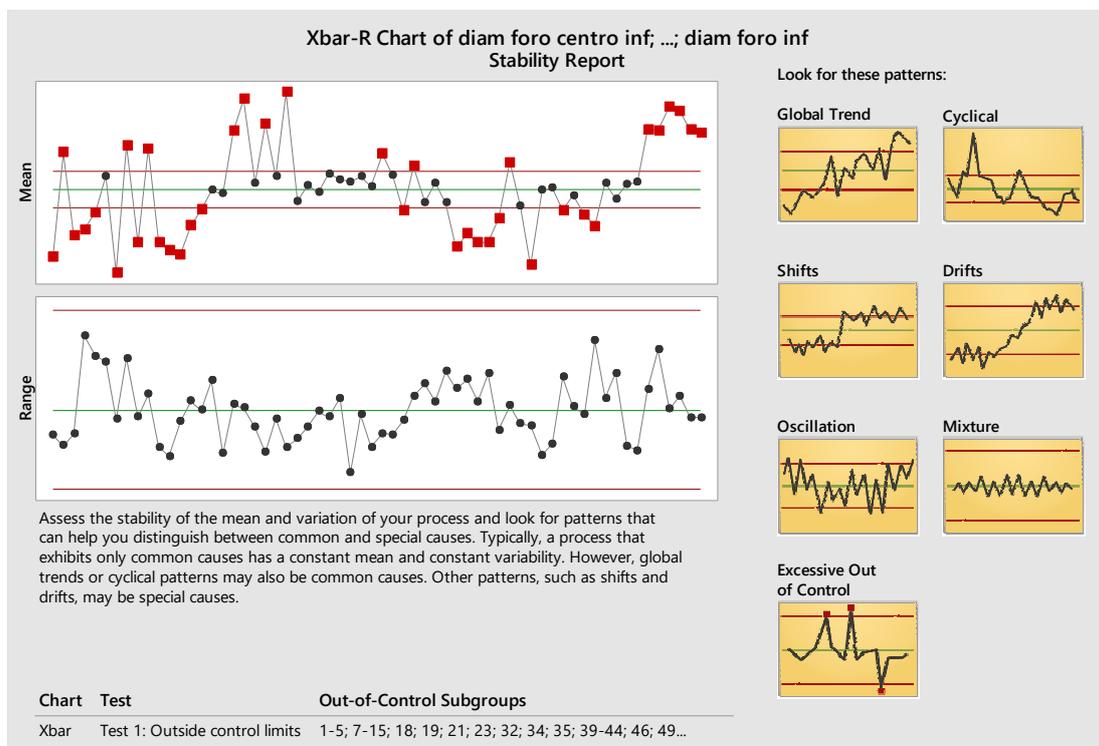


Figura 88. *Xbar-R Chart* del diametro del foro: report di stabilità.

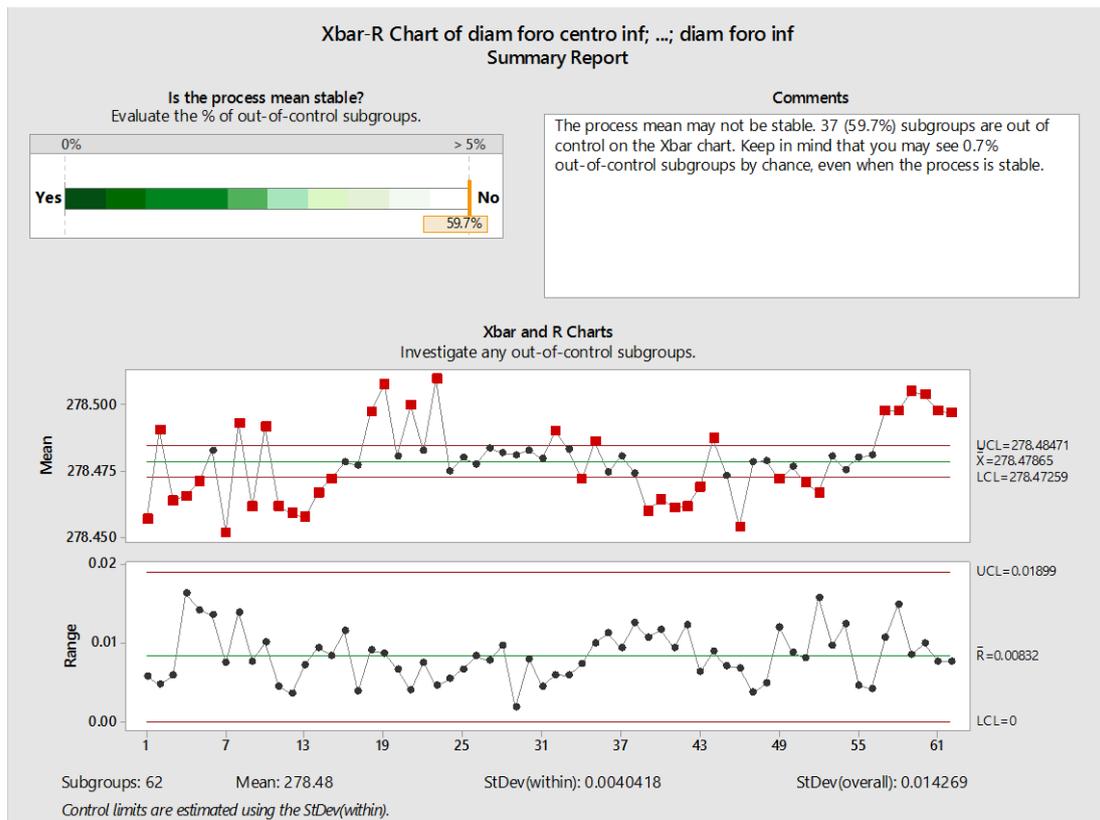


Figura 89. *Xbar-R Chart* del diametro del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 5 punti (8.1%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test sulla quantità dei dati

Non occorre preoccuparsi circa la precisione dei limiti di controllo perché il numero dei punti inclusi nel calcolo è superiore al valore consigliato (70).

Test sulla correlazione dei dati

C'è un alto grado di correlazione tra i dati consecutivi ($r=0.9$), si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della perpendicolarità del foro

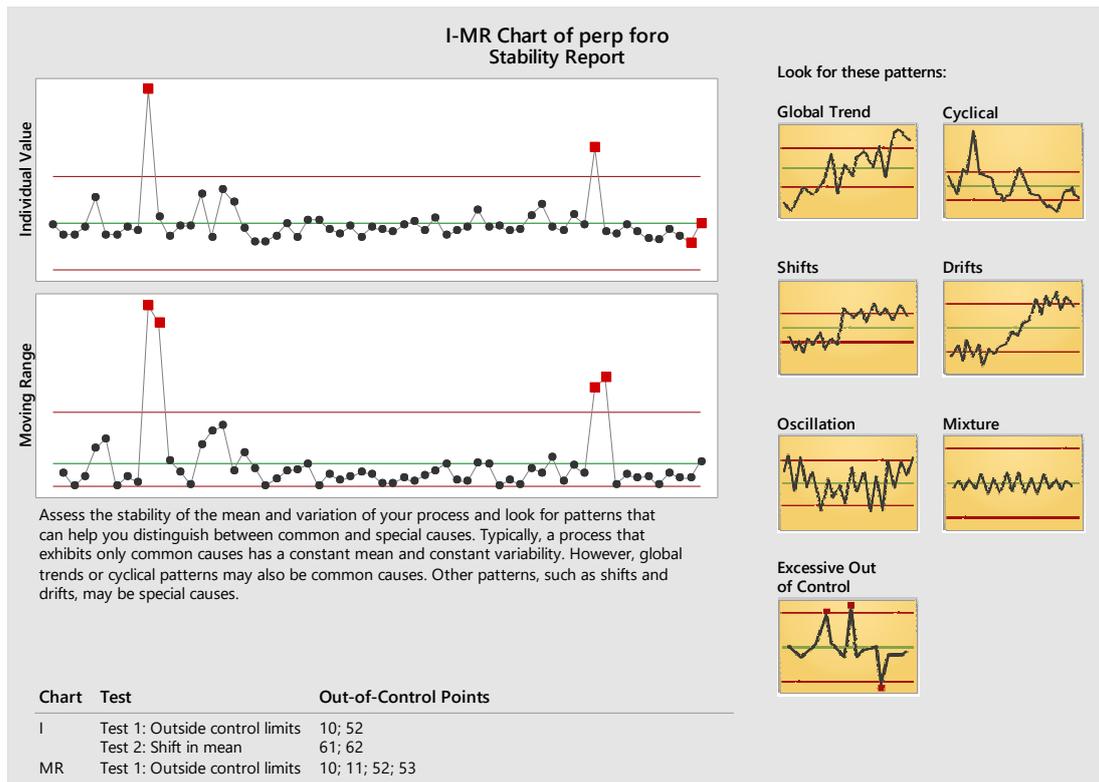


Figura 90. *I-MR Chart* della perpendicolarità del foro: report di stabilità.

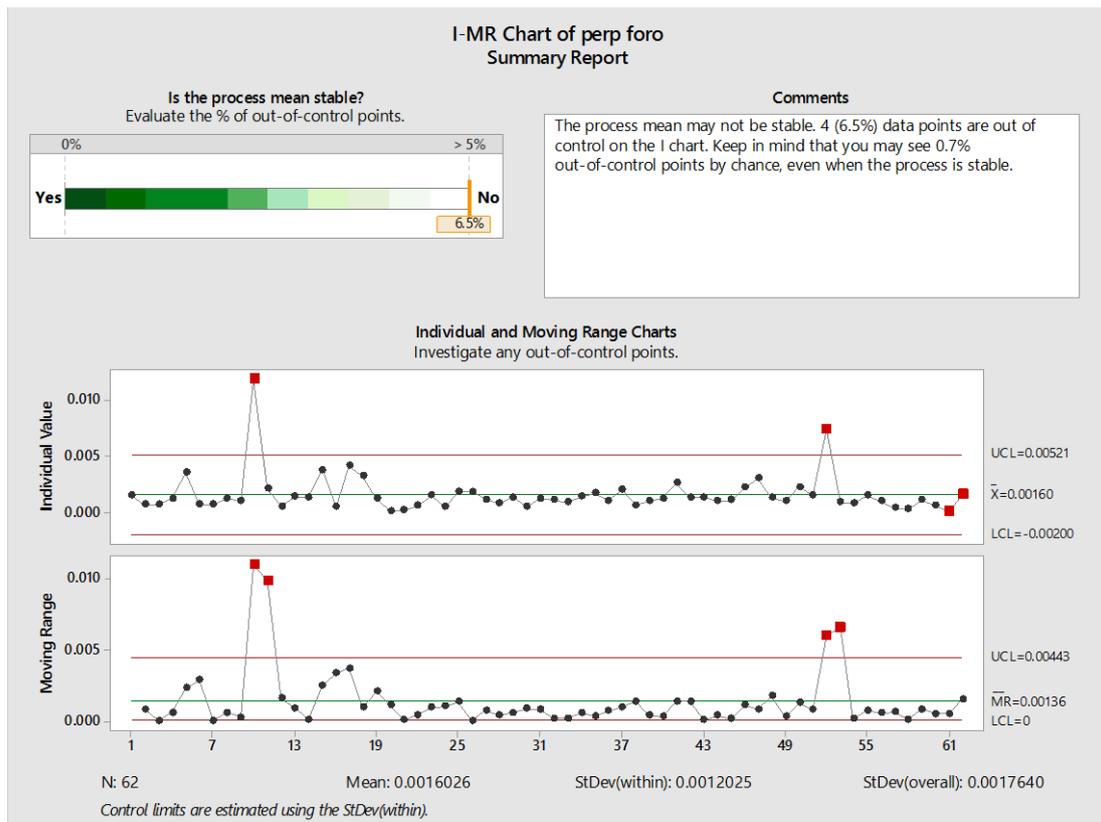


Figura 91. *I-MR Chart* della perpendicolarità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 4 punti (6.5%) sono fuori controllo sull'*I Chart*, 4 punti (6.5%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affiggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

I dati hanno fallito tale test, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che la correlazione tra due punti successivi è inferiore a 0.2, i dati hanno passato tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della rotondità dell'alesatura inferiore

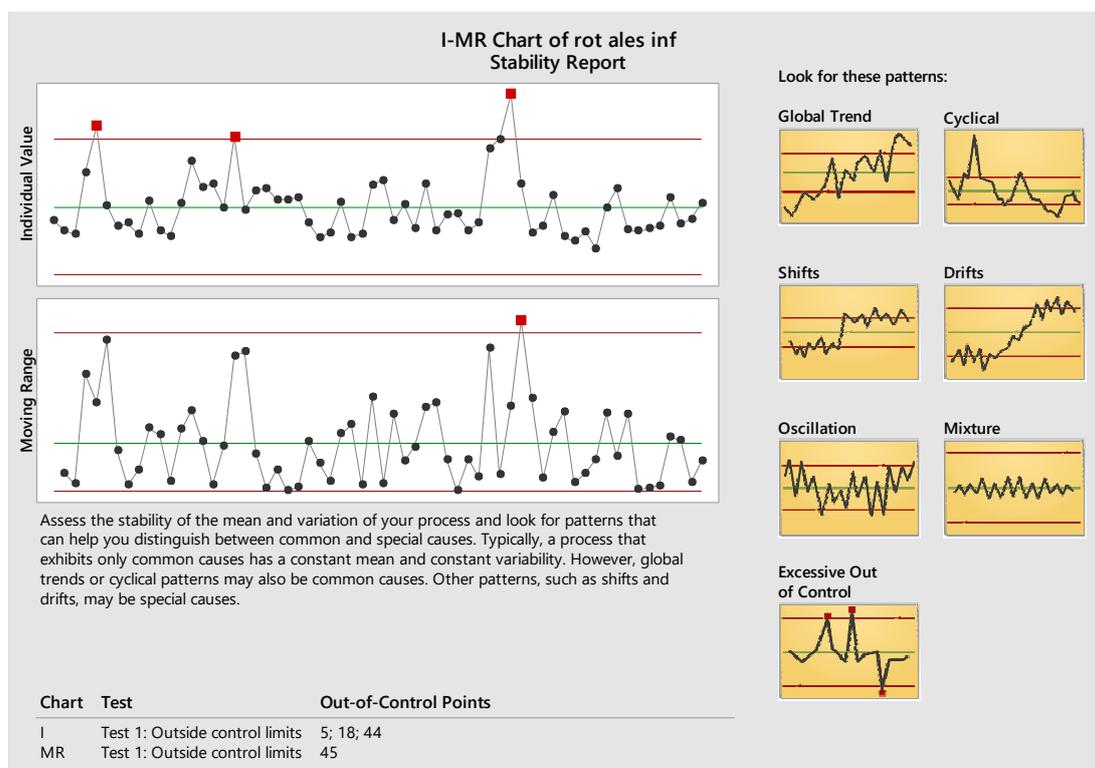


Figura 92. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report di stabilità.

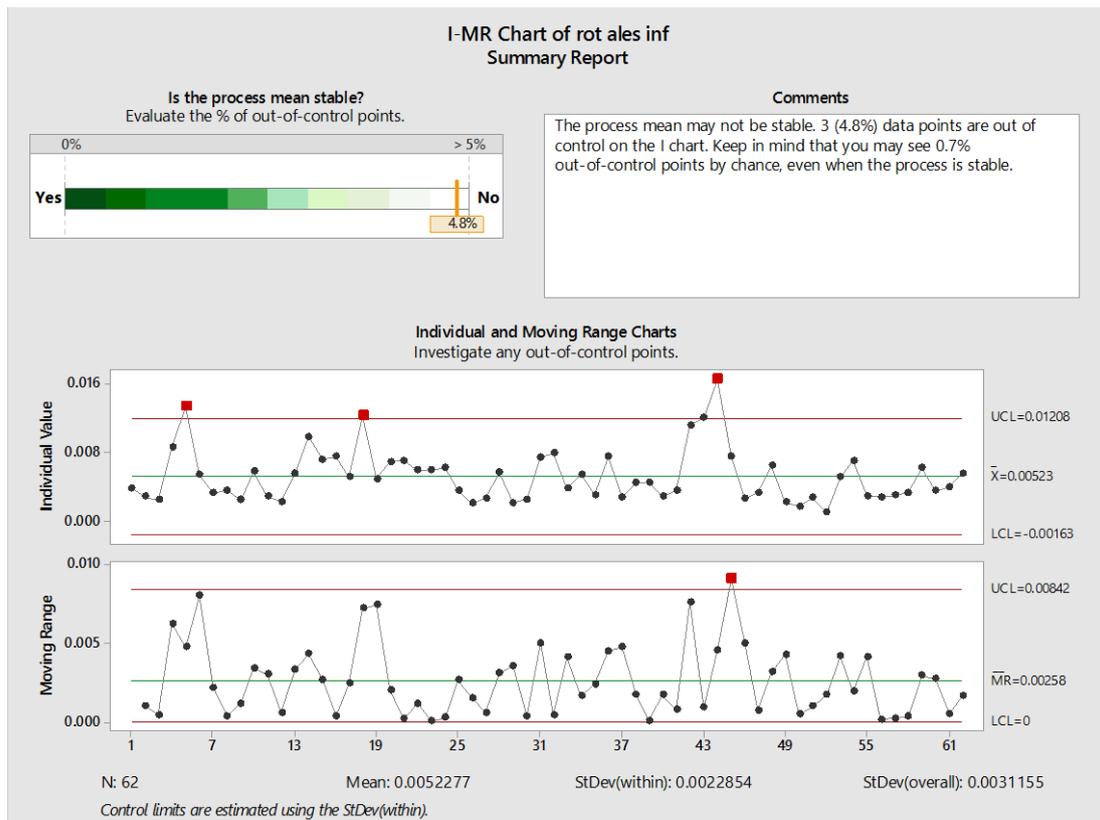


Figura 93. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 1 punto (1.6%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

I dati hanno fallito tale test, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che la correlazione tra due punti successivi è inferiore a 0.2, i dati hanno passato tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della rotondità dell'alesatura superiore

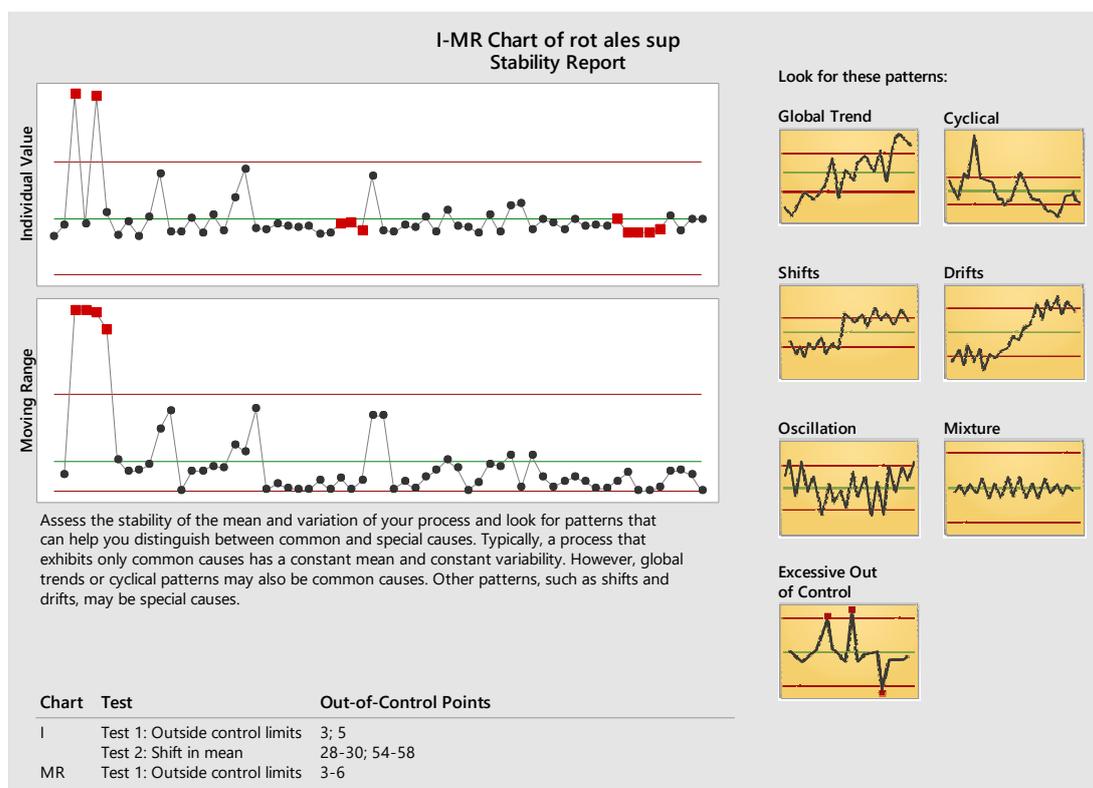


Figura 94. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura superiore: report di stabilità.

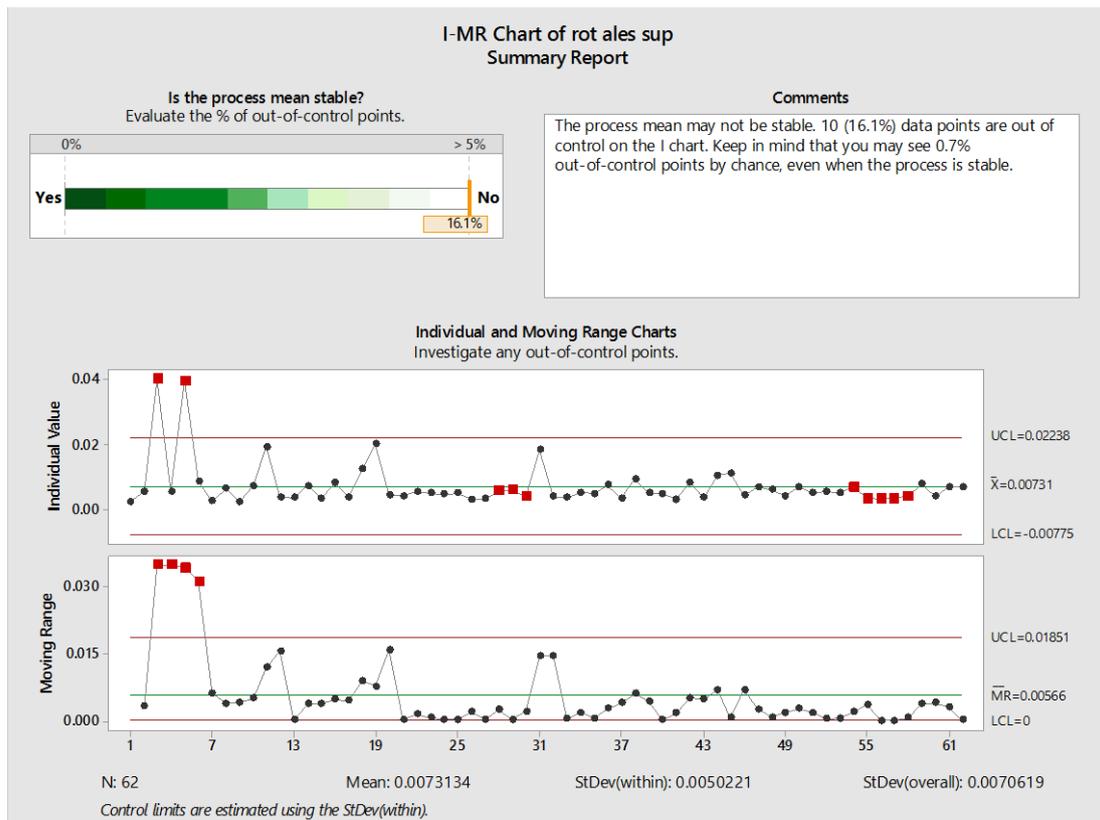


Figura 95. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura superiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 10 punti (16.1%) sono fuori controllo sull'*I Chart*, 4 punti (6.6%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affiggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

I dati hanno fallito tale test, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che la correlazione tra due punti successivi è inferiore a 0.2, i dati hanno passato tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della rotondità del foro

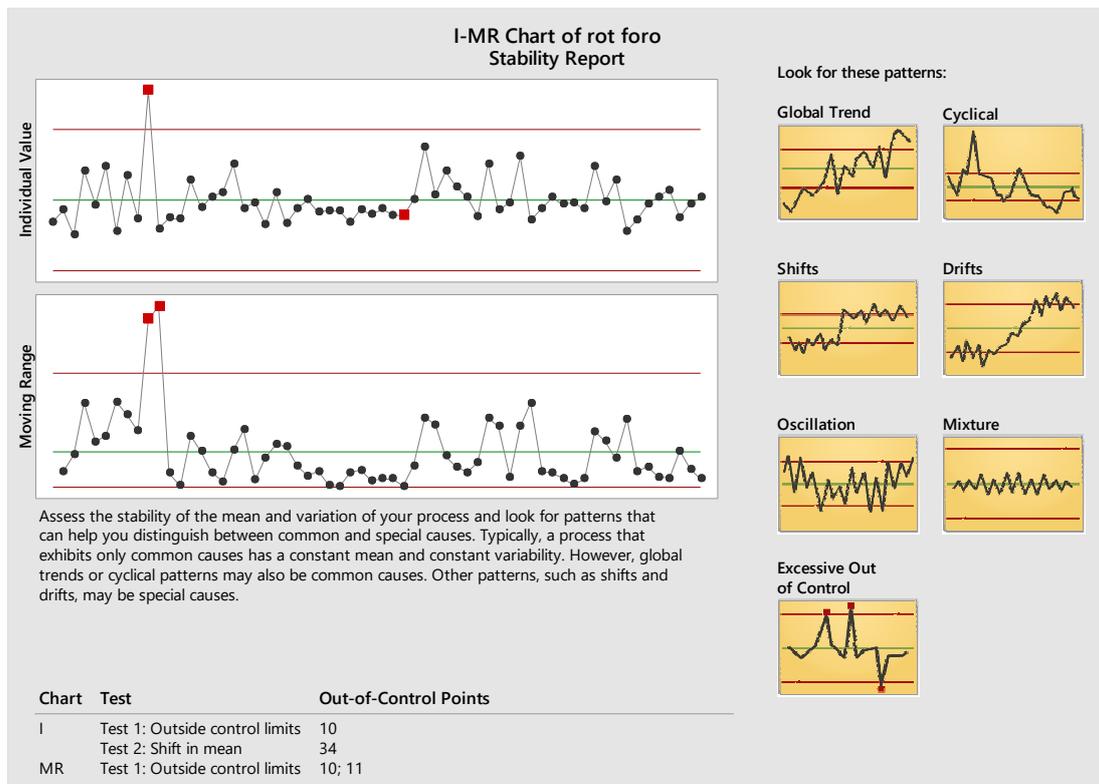


Figura 96. I-MR Chart della rotondità del foro: report di stabilità.

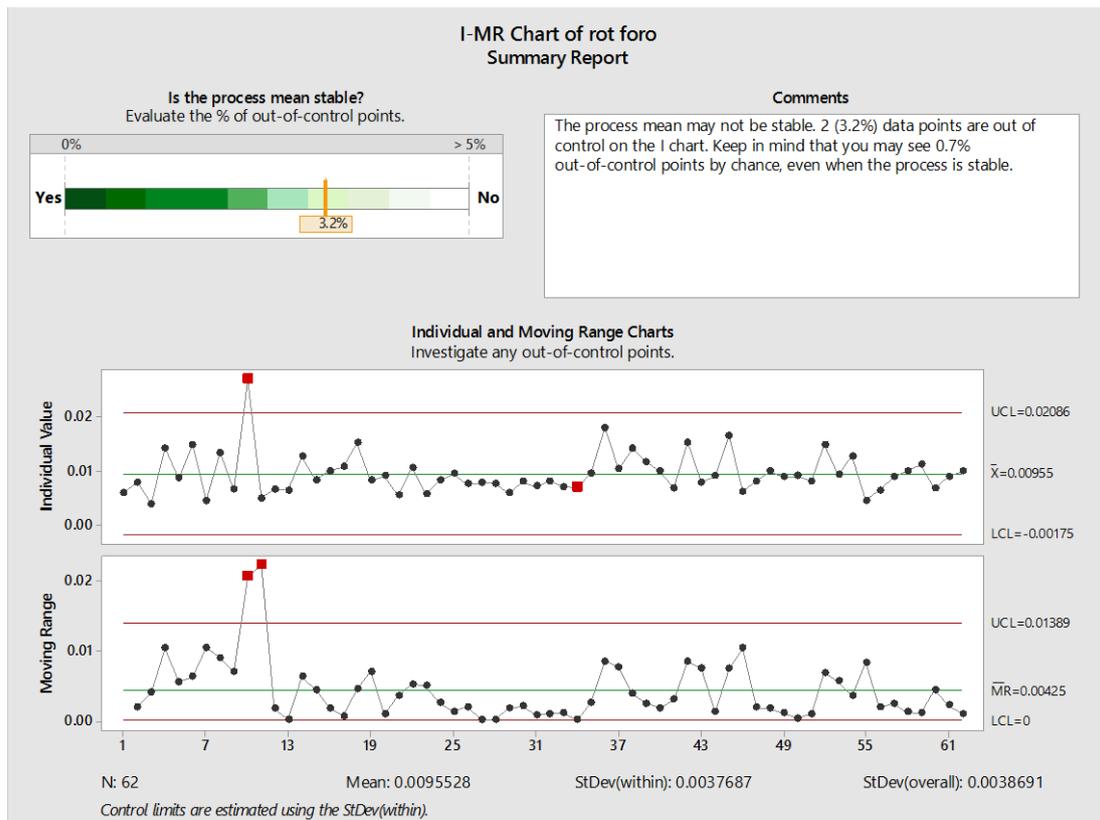


Figura 97. *I-MR Chart* della rotondità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 2 punti (3.2%) sono fuori controllo sull'*I Chart*, 2 punti (3.3%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

In caso di presenza di dati non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che la correlazione tra due punti successivi è inferiore a 0.2, i dati hanno passato tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

10.4.2. Componente B

Xbar-R Chart della concentricità del foro

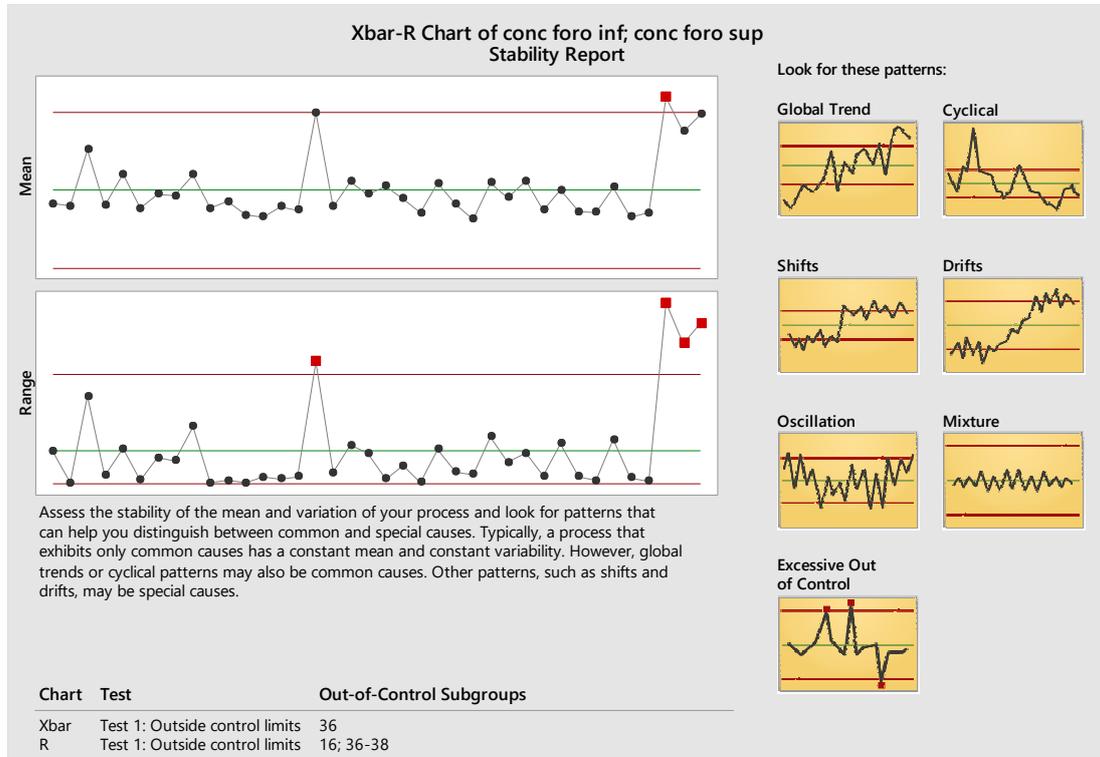


Figura 98. *Xbar-R Chart* della concentricità del foro: report di stabilità.

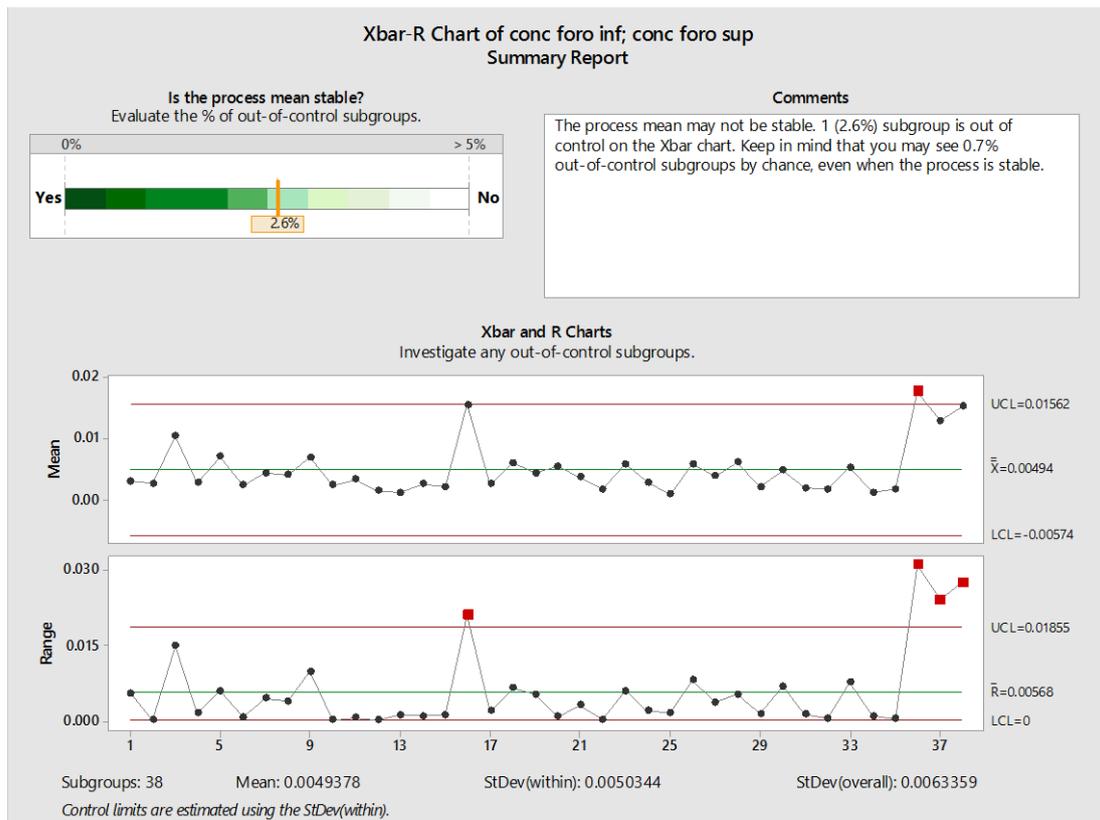


Figura 99. *Xbar-R Chart* della concentricità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 1 sottogruppo (2.6%) sono fuori controllo sull'*Xbar Chart*, 4 sottogruppi (10.5%) sono fuori controllo sull'*R Chart*, che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*Xbar Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di sottogruppi fuori controllo sull'*Xbar Chart* e 0.9% sull'*R Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi ed occorrerebbe correggere il problema.

Dato che la meno di due sottogruppi sono fuori dai limiti di controllo sull'*Xbar Chart* non occorre fare tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento differente rispetto allo storico, a causa delle variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della conicità del foro

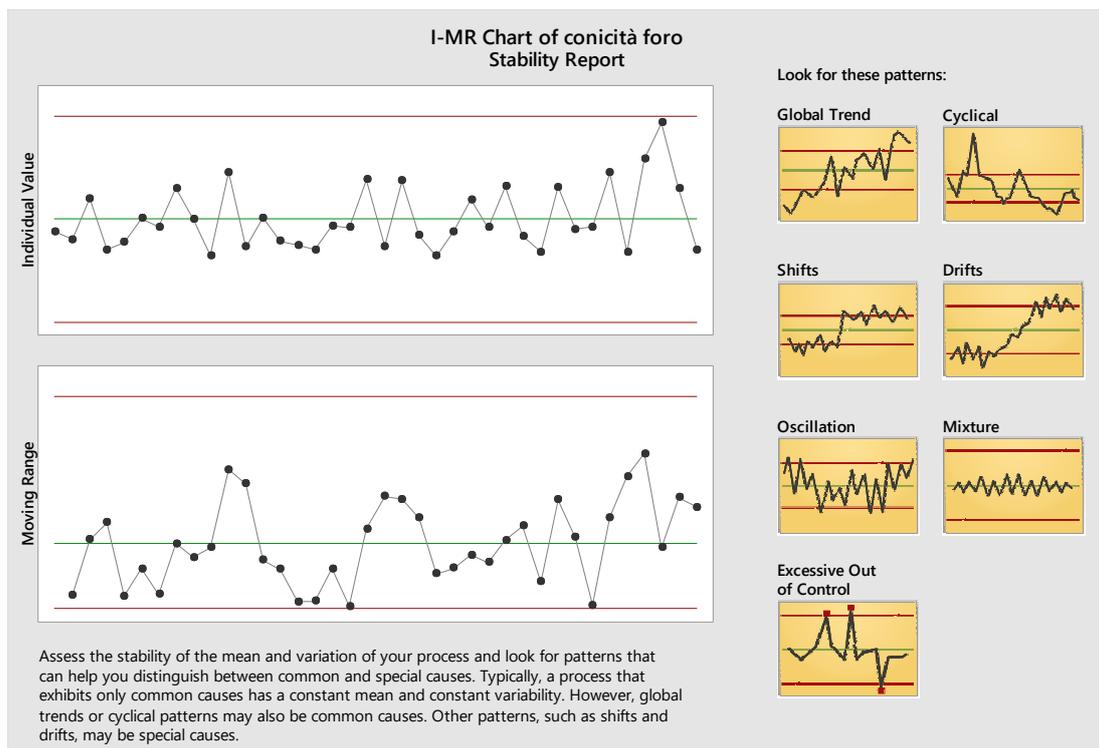


Figura 100. *I-MR Chart* della conicità del foro: report di stabilità.

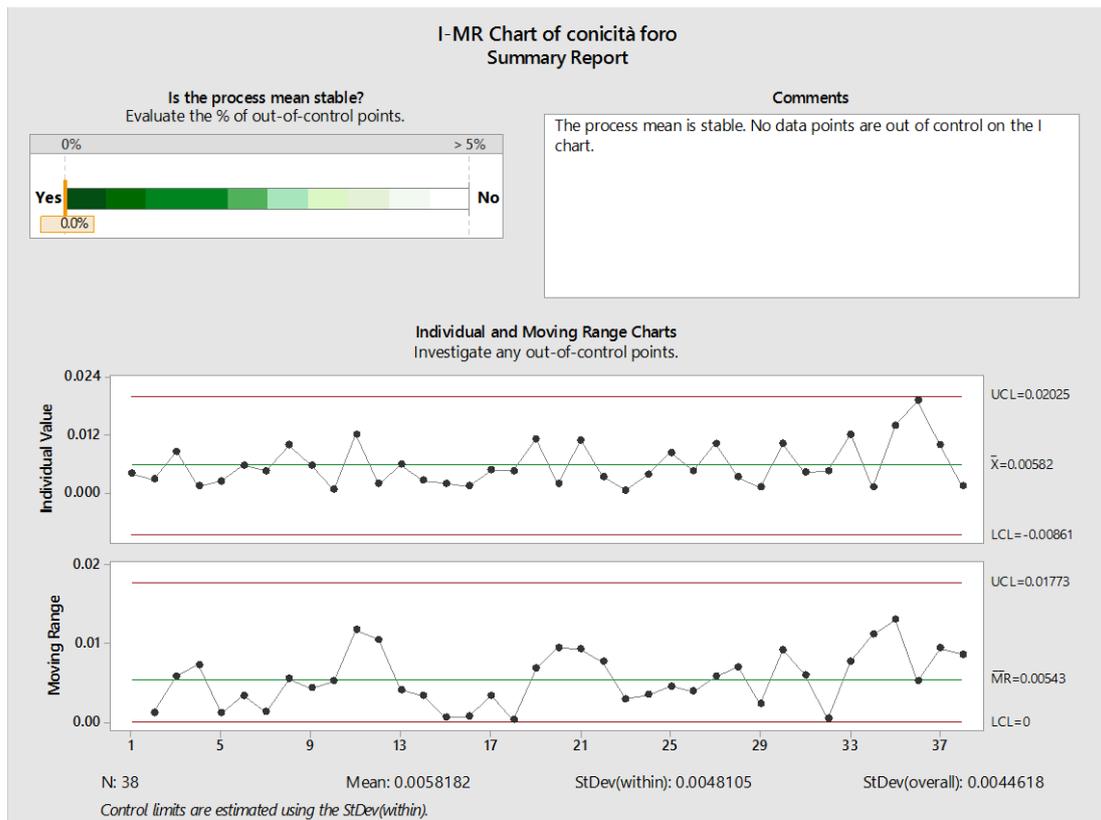


Figura 101. *I-MR Chart* della conicità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La variazione del processo e la media sono stabili. Non vi sono punti fuori controllo su nessuno dei due *Charts*.

Test di normalità

In caso di presenza di dati non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di correlazione.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart del diametro dell'alesatura inferiore

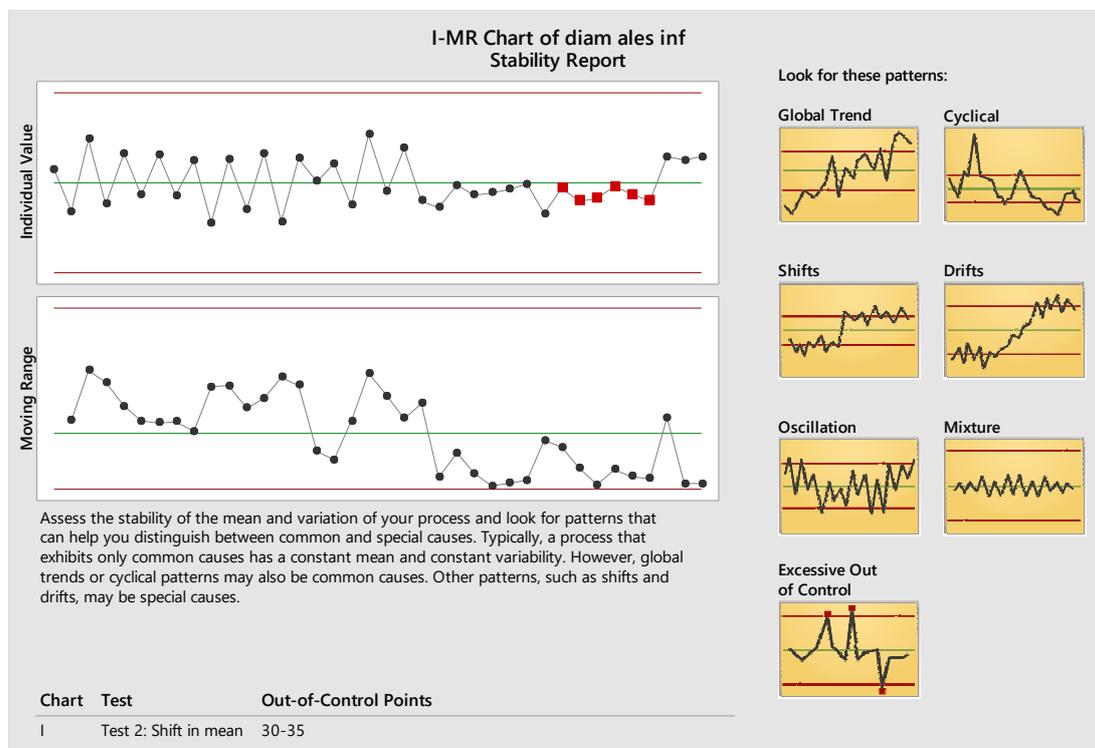


Figura 102. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura inferiore: report di stabilità.

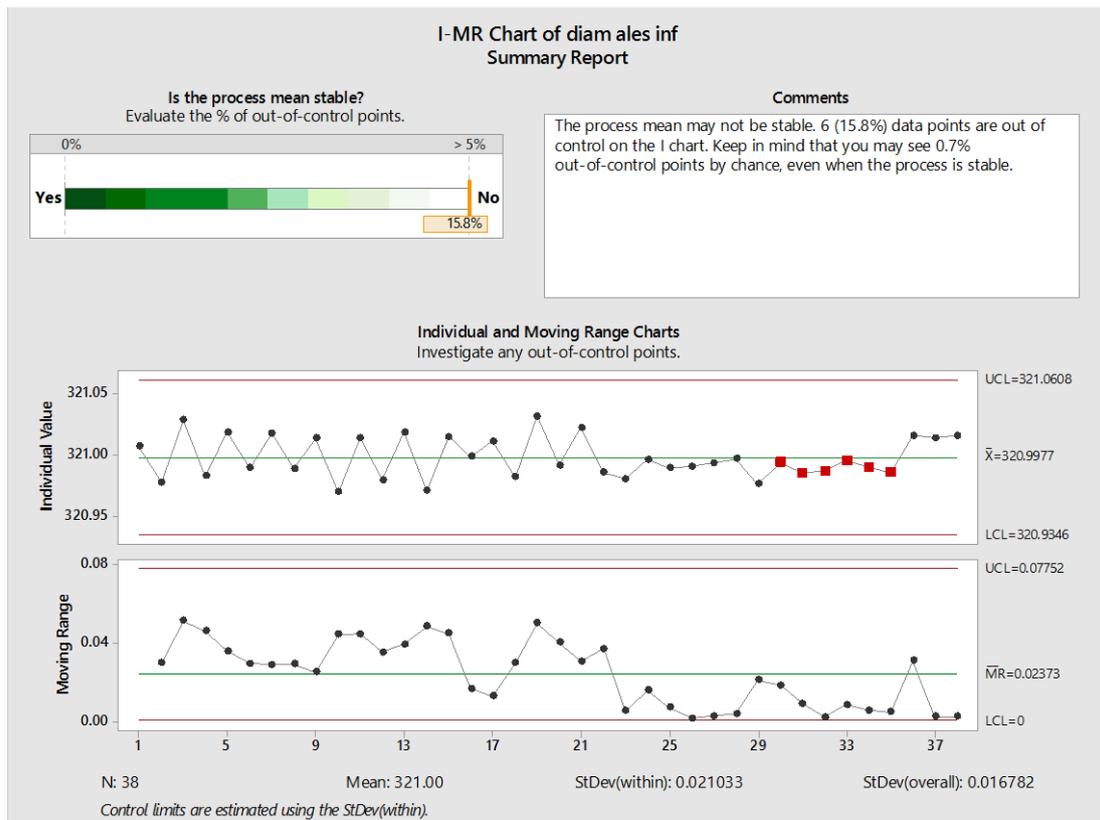


Figura 103. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura inferiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La variazione è stabile. Non vi sono punti fuori controllo sull'*MR Chart*. Tuttavia, la media del processo potrebbe non essere stabile, 6 punti (15.8%) sono fuori i limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

In caso di presenza di dati non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di correlazione.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento differente rispetto allo storico, a causa delle variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart del diametro dell'alesatura superiore

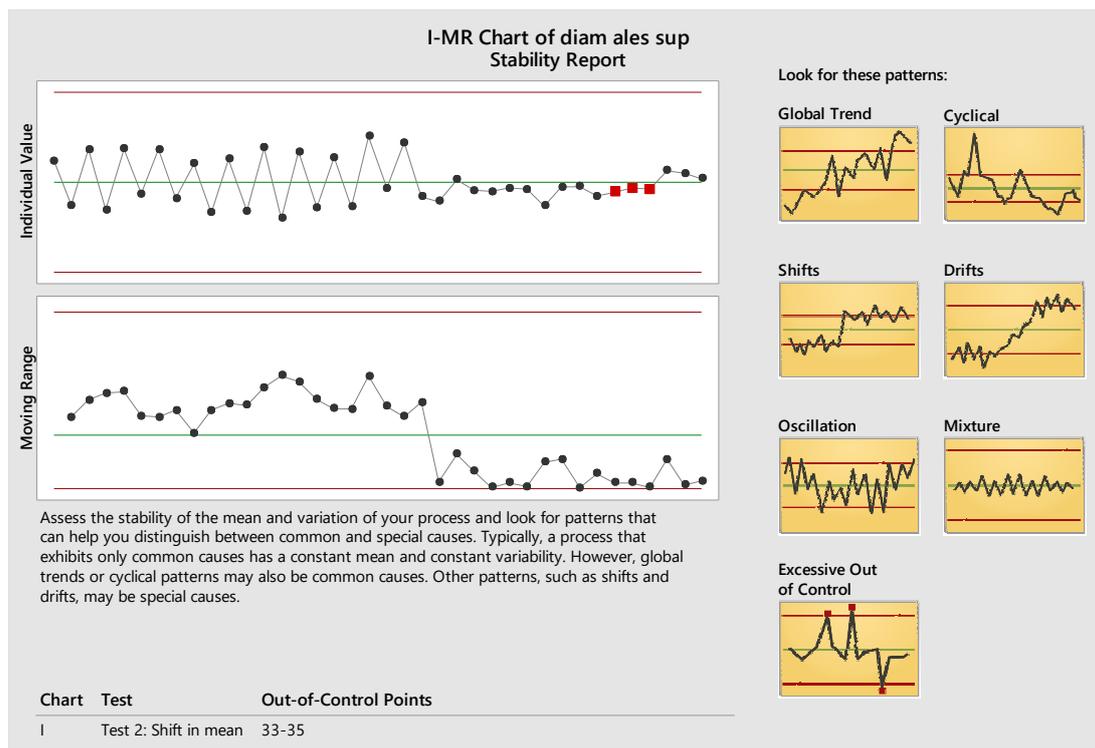


Figura 104. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura superiore: report di stabilità.

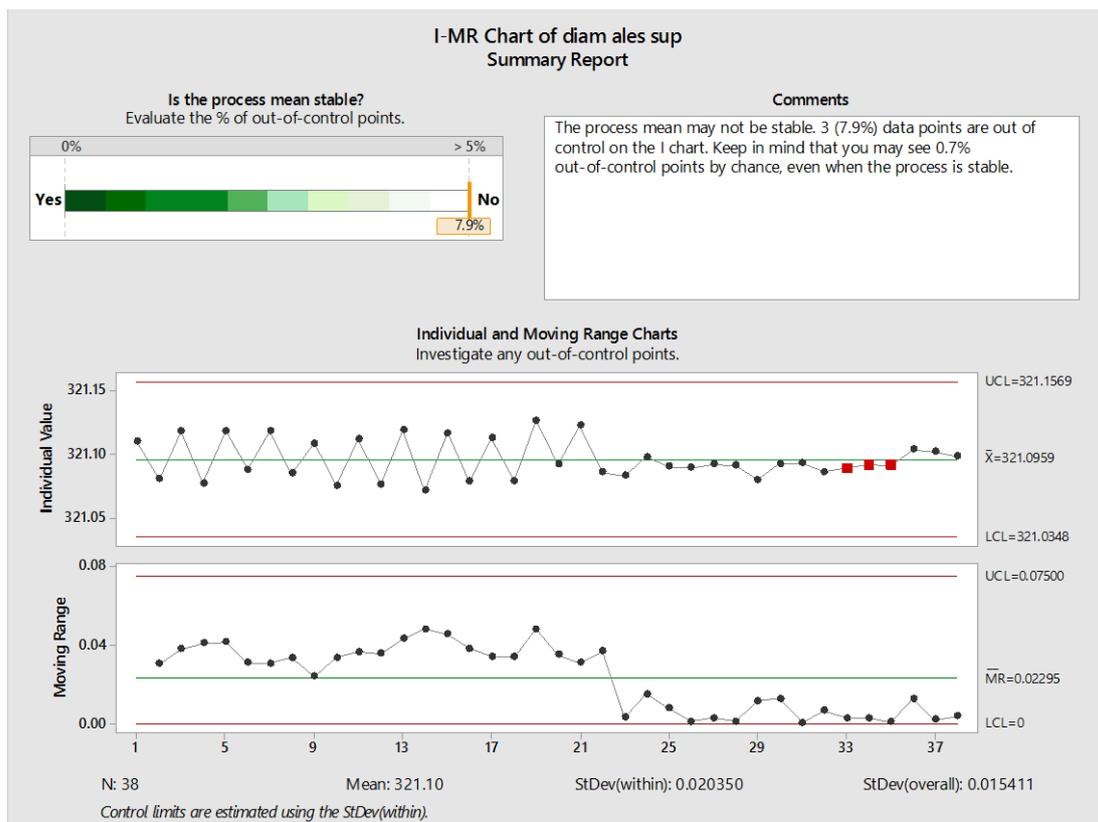


Figura 105. *I-MR Chart* del diametro dell'alesatura superiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La variazione del processo è stabile. Non vi sono punti fuori controllo sull'*MR Chart*.

Tuttavia, la media del processo potrebbe non essere stabile, 3 punti (7.9%) sono fuori controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

In caso di presenza di dati non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Siccome meno del 2% dei punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che meno del 2% dei punti sono fuori i limiti di controllo sull'I Chart, non occorre effettuare tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento differente rispetto allo storico, a causa delle variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

Xbar-R Chart del diametro del foro

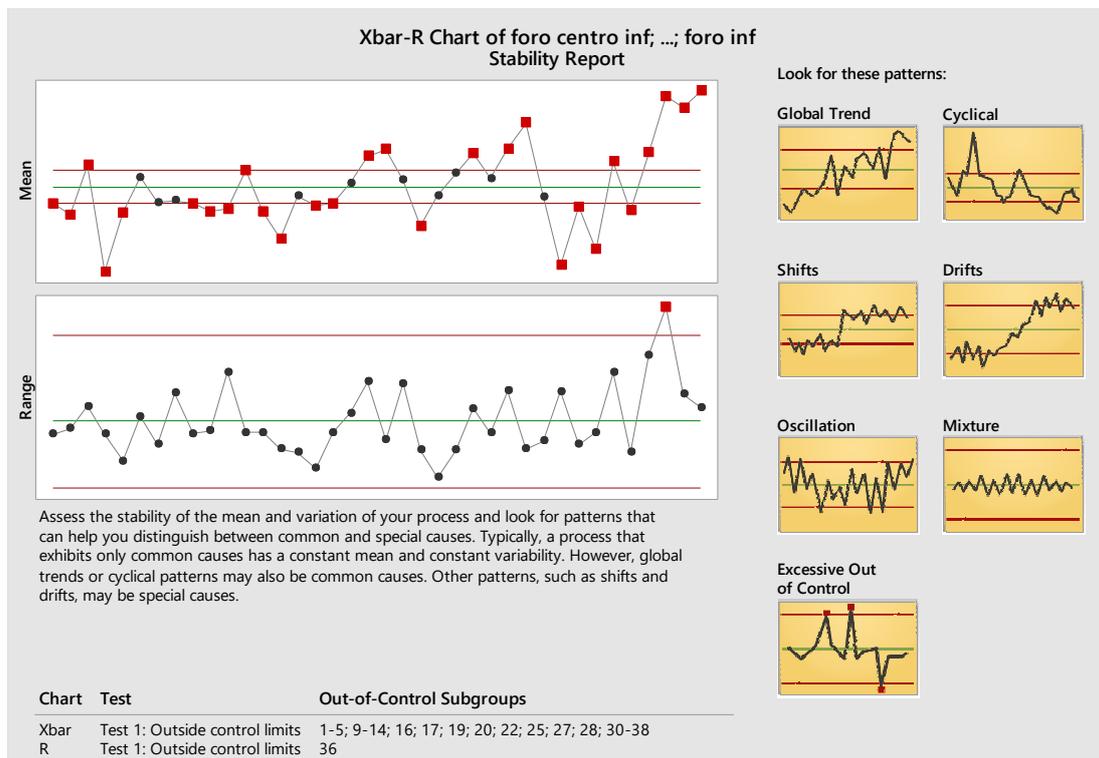


Figura 106. Xbar-R Chart del diametro del foro: report di stabilità.

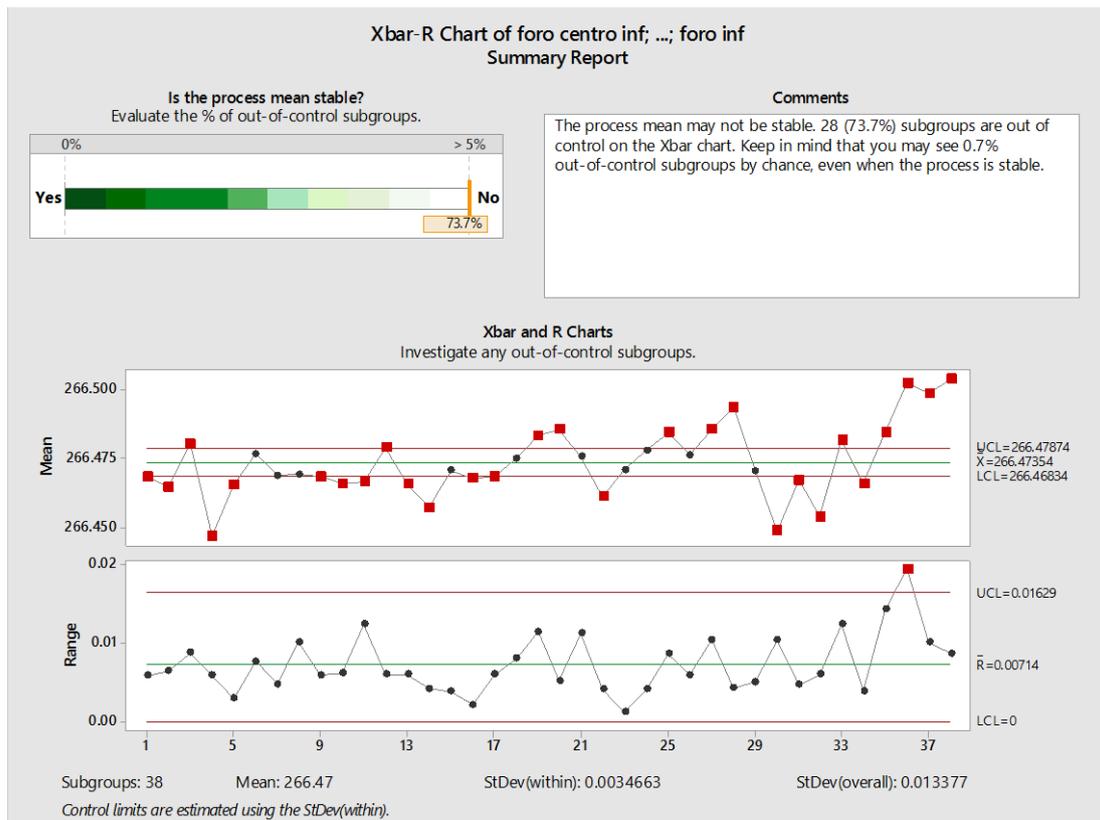


Figura 107. *Xbar-R Chart* del diametro del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 28 sottogruppi (73.7%) sono fuori controllo sull'*Xbar Chart*, 1 sottogruppo (2.6%) è fuori dagli estremi di controllo sull'*R Chart* che potrebbero affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*Xbar Chart* e 0.5% sull'*R Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test sulla quantità dei dati

Non occorre preoccuparsi circa la precisione dei limiti di controllo perché il numero dei punti inclusi nel calcolo è superiore al valore consigliato (70).

Test sulla correlazione dei dati

C'è un alto grado di correlazione tra i dati consecutivi entro ogni sottogruppo ($r=0.9$), si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento differente rispetto allo storico, a causa delle variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della perpendicolarità del foro

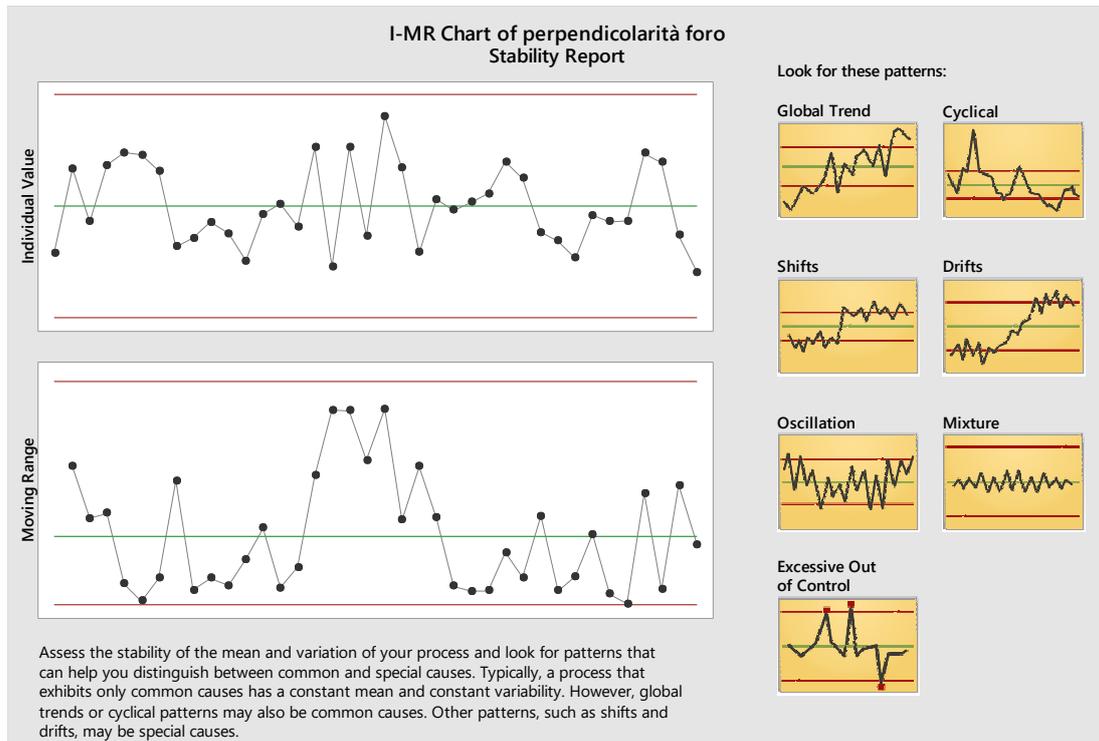


Figura 108. *I-MR Chart* della perpendicolarità del foro: report di stabilità.

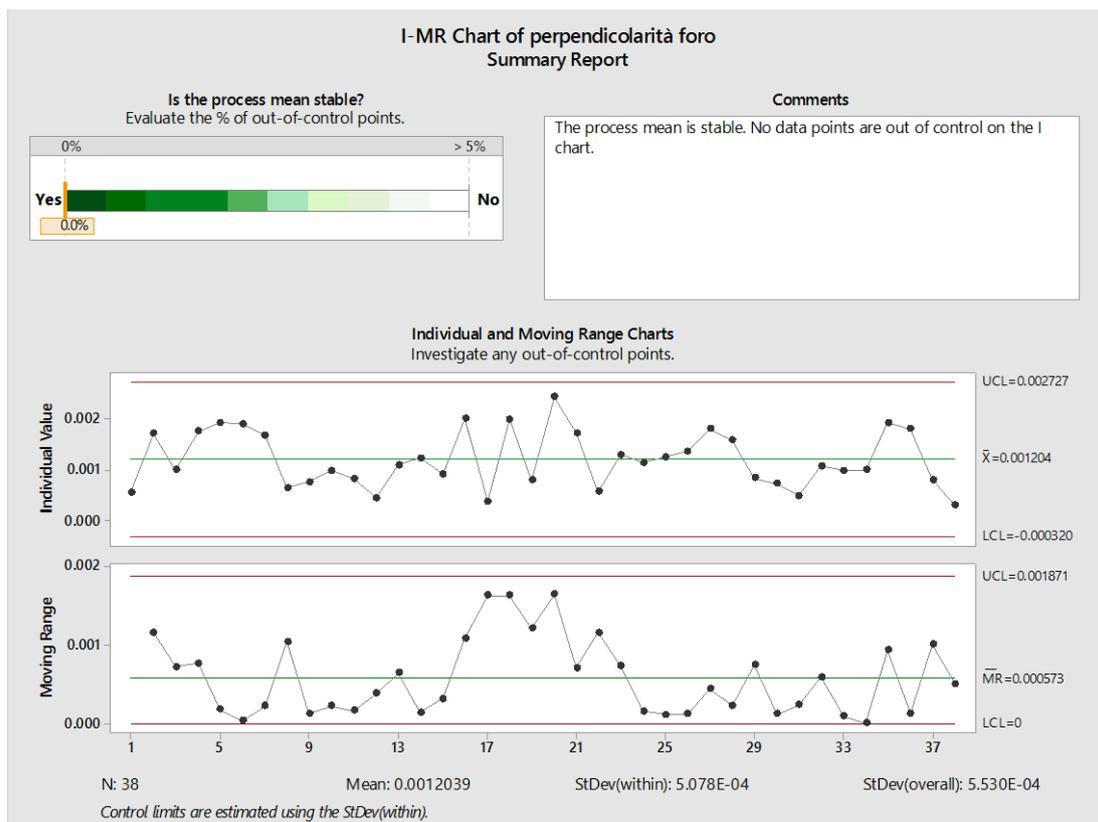


Figura 109. *I-MR Chart* della perpendicolarità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione sono stabili. Non vi sono punti fuori controllo su nessuno dei due diagrammi.

Test di normalità

I dati hanno fallito tale test, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (*100*), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che meno del 2% dei punti sono fuori i limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento non molto differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della rotondità dell'alesatura inferiore

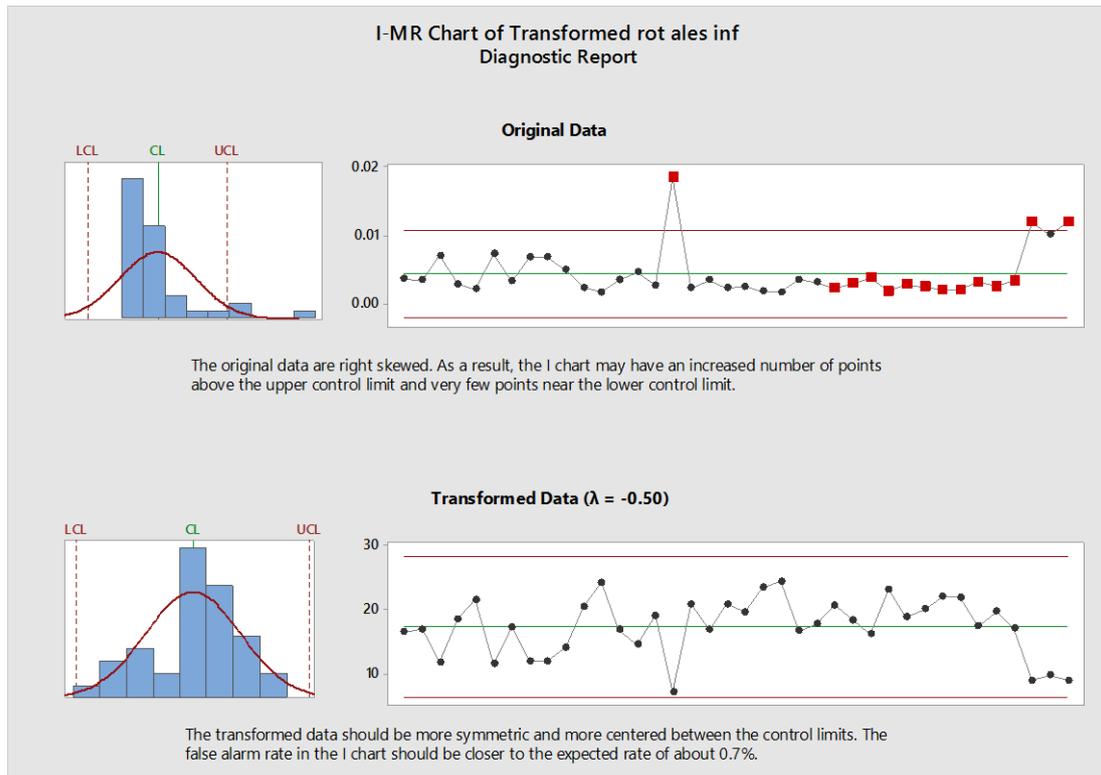


Figura 110. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report diagnostico.

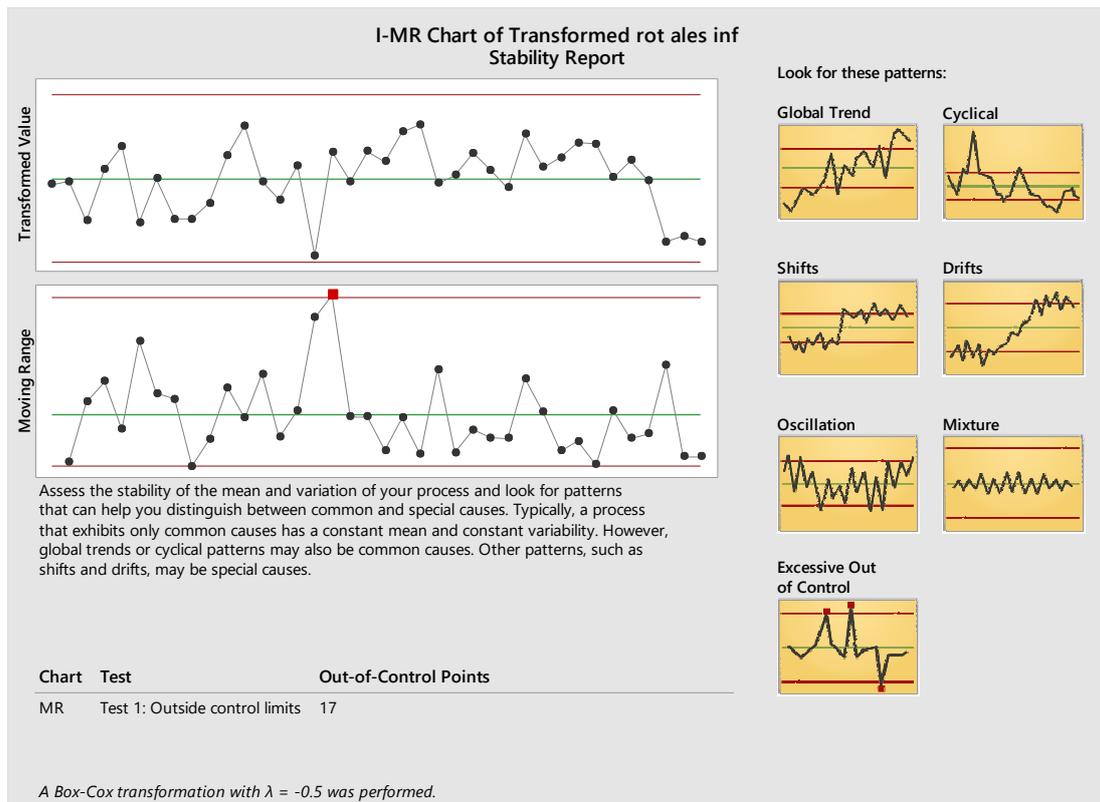


Figura 111. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report di stabilità.

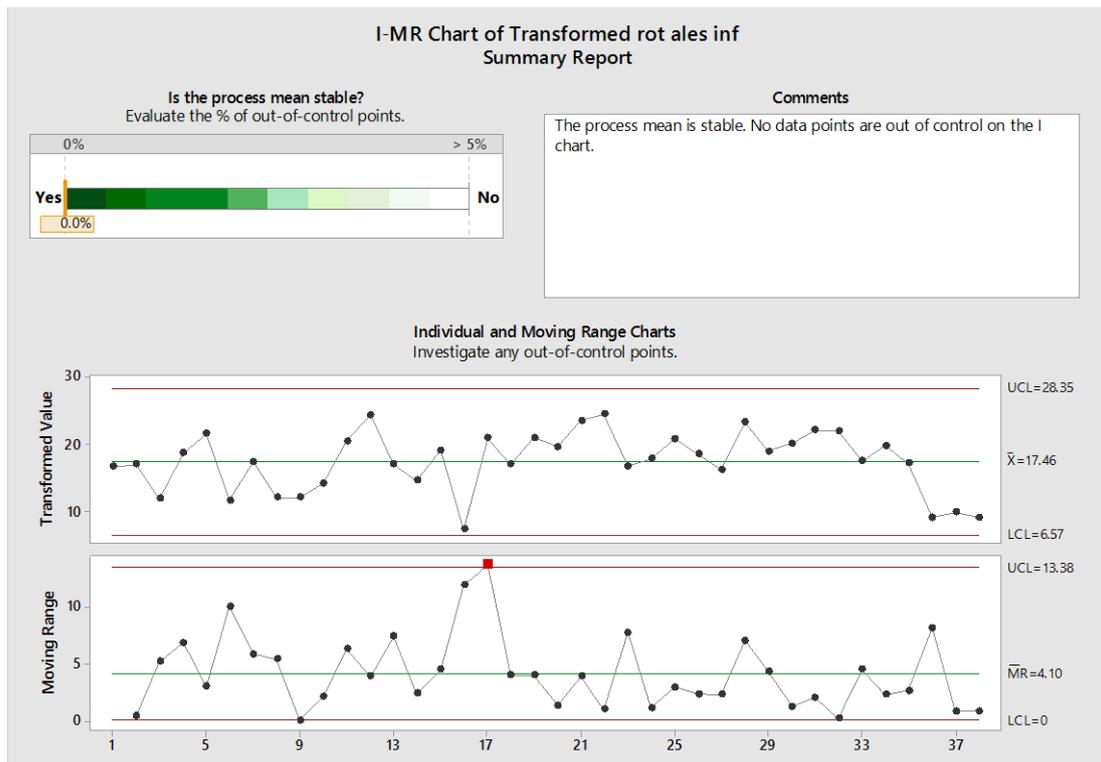


Figura 112. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili. Tuttavia, non ci sono punti fuori controllo sull'*I Chart*, solo un punto fuori controllo sull'*MR Chart* (2.7%), che potrebbe affliggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*, rendendo difficile per valutare la stabilità della media del processo.

Si dovrebbero avere 0.9% di punti fuori controllo sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

I dati trasformati hanno passato il test di stabilità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che meno del 2% dei punti sono fuori i limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, si osserva un andamento differente rispetto allo storico, a causa delle variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della rotondità dell'alesatura superiore

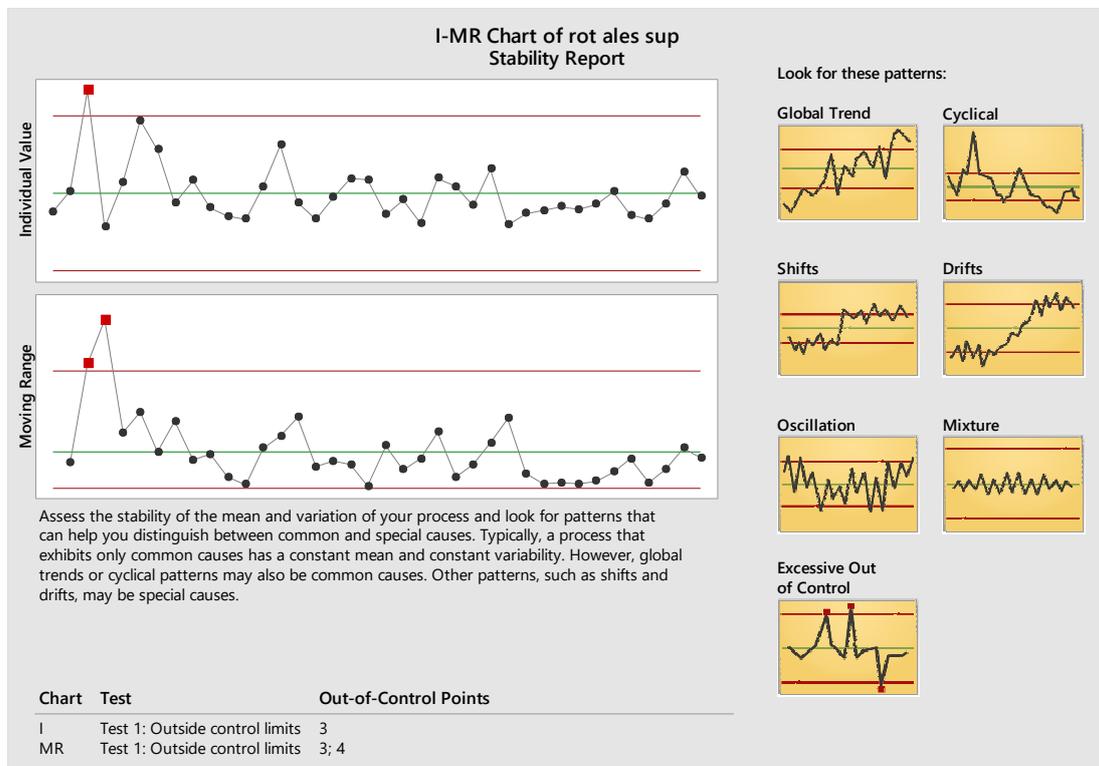


Figura 113. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura superiore: report di stabilità.

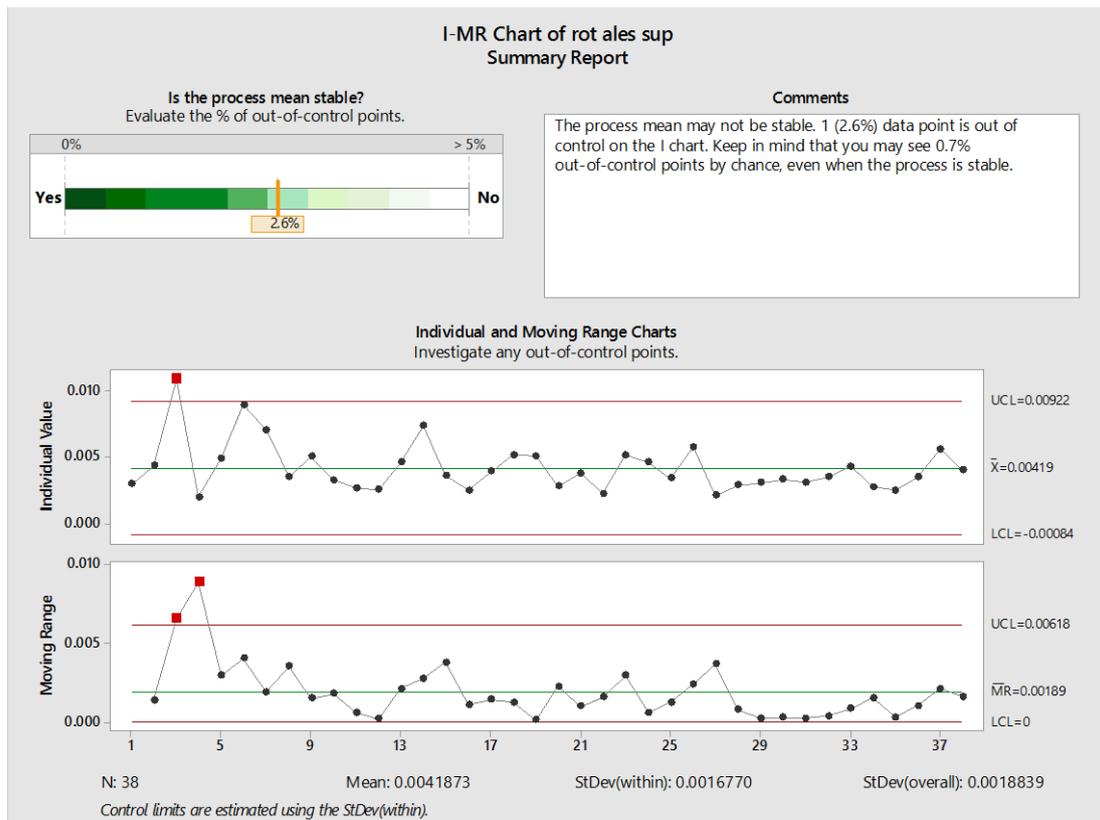


Figura 114. *I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura superiore: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione potrebbero non essere stabili, 1 punto (2.6%) sono fuori controllo sull'*I Chart*, 2 punti (5.4%) sono fuori controllo sull'*MR Chart*, che potrebbero affiggere la validità dei limiti di controllo sull'*I Chart*.

Si dovrebbero avere 0.7% di punti fuori controllo sull'*I Chart* e 0.9% sull'*MR Chart* occasionalmente, anche quando il processo è stabile.

Si dovrebbero investigare i sottogruppi fuori controllo ed omettere quelli con cause speciali dai calcoli.

Test di normalità

Se i dati sono non normali, si dovrebbe vedere un incremento nel numero dei falsi allarmi. Dato che meno di 2 punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre tale test.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Se c'è correlazione tra i dati, si dovrebbe vedere un elevato numero di falsi allarmi, occorrerebbe correggere il problema.

Dato che meno di 2 punti sono fuori dai limiti di controllo sull'*I Chart*, non occorre tale test.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento molto differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

I-MR Chart della rotondità del foro

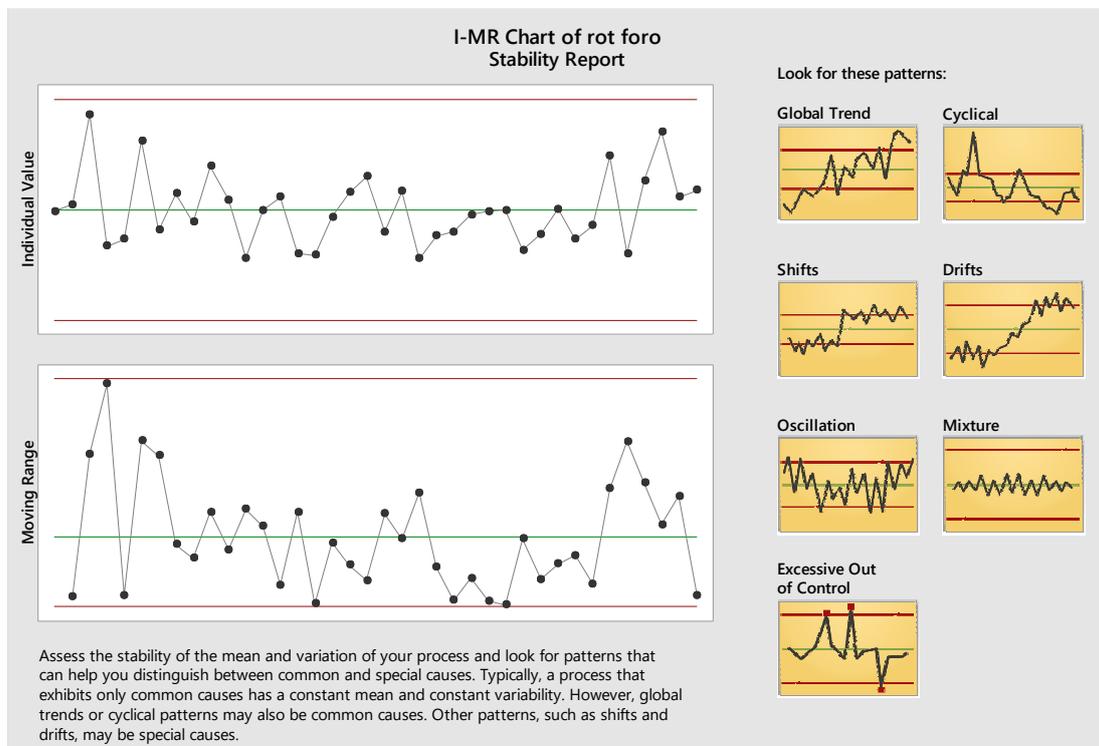


Figura 115. *I-MR Chart* della rotondità del foro: report di stabilità.

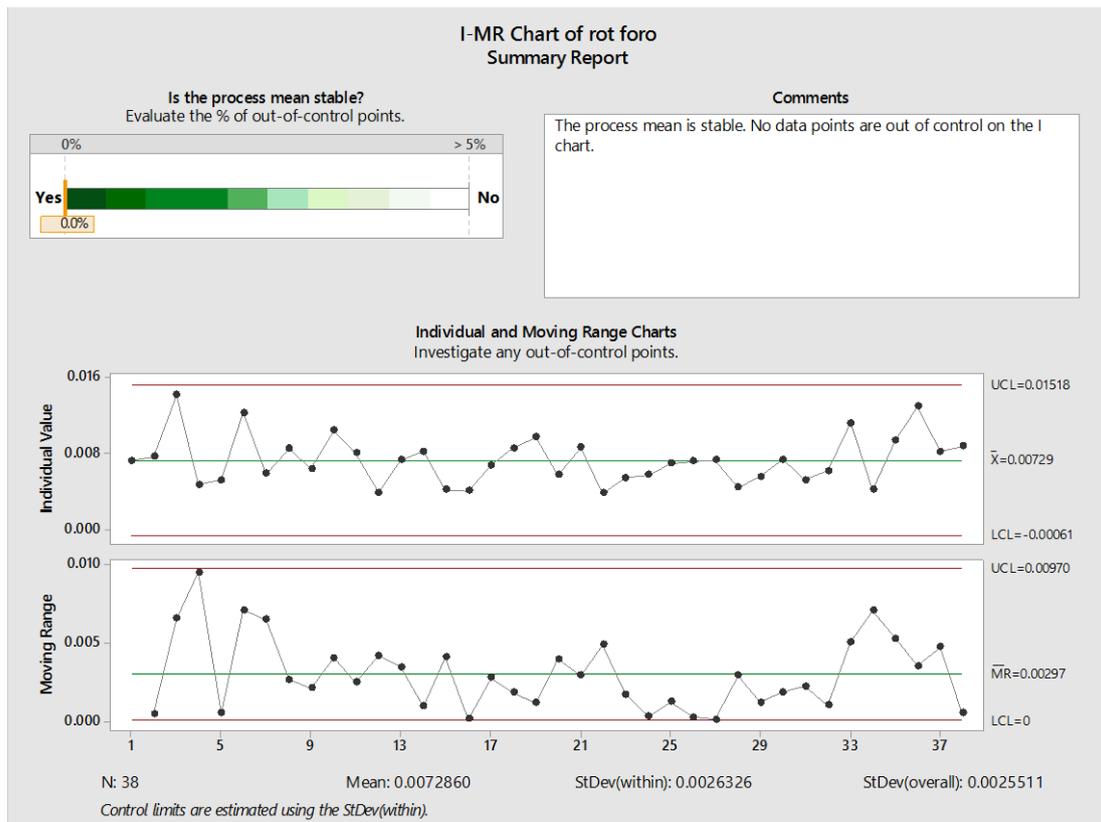


Figura 116. *I-MR Chart* della rotondità del foro: report sommario.

Considerazioni

Test di stabilità

La media del processo e la variazione sono stabili. Non sono presenti punti fuori controllo statistico su nessuno dei due grafici.

Test di normalità

Siccome meno del 2% dei dati è fuori dai limiti del controllo sul grafico, non è stato necessario fare il test di normalità.

Test sulla quantità dei dati

Siccome il numero dei punti è inferiore al valore consigliato (100), la precisione dei limiti di controllo potrebbe non essere elevata.

Test sulla correlazione dei dati

Siccome meno del 2% dei dati è fuori dai limiti del controllo sul grafico, non è stato necessario fare il test di correlazione.

Punti di prova

Per i punti riguardanti le prove svolte, non si osserva un andamento differente rispetto allo storico, nonostante le variazioni dei parametri indotte per effettuarle, ma tali punti non risultano fuori dal controllo statistico.

10.4.3. Considerazioni finali dopo l'analisi ed il confronto dimensionale con lo storico dei dati

Segue che ciascuna coppia dei parametri introdotti, pur non potendo considerare rilevante una singola prova ai fini della valutazione dell'attendibilità di questi nella lavorazione, non comporta variazioni significative nella geometria lavorata, quindi neanche nel controllo dimensionale.

Perciò si è deciso di estendere la coppia dei parametri che consente il valore minore dell'usura dell'inserto nella lavorazione ed anche la minor durata ad un numero superiore di campioni per poterne collaudare la ripetibilità, quindi ad un intero lotto di componenti.

11. Prove estese su di un intero lotto del componente B

Dopo aver lavorato un intero lotto di prove con tali parametri considerati ottimali, in questo caso non si è provveduto a misurare singolarmente gli inserti come per le prove precedenti, ma ci si è limitati alla loro osservazione mediante il microscopio digitale al fine di rilevare l'usura e constatarne la somiglianza e l'assenza di anomalie rispetto a quella misurata nella prova con la coppia di parametri scelta per l'esecuzione del lotto.

- Parametri utilizzati in precedenza:
 - $F=0.12 \text{ mm/giro}$
 - $S=90 \text{ m/min}$

- Parametri utilizzati (post-ottimizzazione):
 - $F=0.15 \text{ mm/giro}$
 - $S=130 \text{ m/min}$

- Variazione nella durata della lavorazione della fase:
 - *Before: 9.27 min*
 - *After: 5.38 min*

Dopo ciò, dato che ogni pezzo in seguito alla lavorazione di tornitura viene misurato tramite una macchina di misura a coordinate 3D, si sono acquisiti i report dimensionali di ognuno dei pezzi del lotto lavorati, si sono isolati, come fatto in precedenza, i dati geometrici relativi alle dimensioni influenzate dalla fase oggetto di studio e si sono effettuate delle analisi statistiche come quelle descritte precedentemente per effettuare il confronto con lo storico dati.

Tali analisi svolte sono della stessa tipologia citata precedentemente, ma di modalità differente, in quanto sono stati realizzati dei *Before/After Chart* per valutare delle eventuali variazioni nel processo di controllo indotte dalla variazione dei parametri di lavorazione.

11.1. Before/After Charts: I-MR Chart, Xbar-R Chart

L'I-MR Chart Before/After e l'Xbar-R Chart Before/After si utilizzano per fare comparazioni prima e dopo una variazione di processo.

Il software non restituisce alcuna condizione di check che influenza il rateo dei falsi allarmi o l'accuratezza dei limiti di controllo.

Se la differenza nella media di processo e nella deviazione standard di processo è statisticamente significativa, occorre considerare le dimensioni della differenza per determinare se esse hanno implicazioni pratiche. Se la dimensione dei campioni è rilevante, anche piccole differenze possono essere statisticamente significative.

Occorre usare la conoscenza posseduta sul processo con i risultati del test per determinare se la differenza è significativa.

Occorre cercare le differenze nella linea centrale e nei limiti di controllo, che sono calcolati indipendentemente per ogni stadio, per determinare come il cambiamento affligge il processo. In particolare, su:

- Medie
- Variazioni
- Stato del controllo

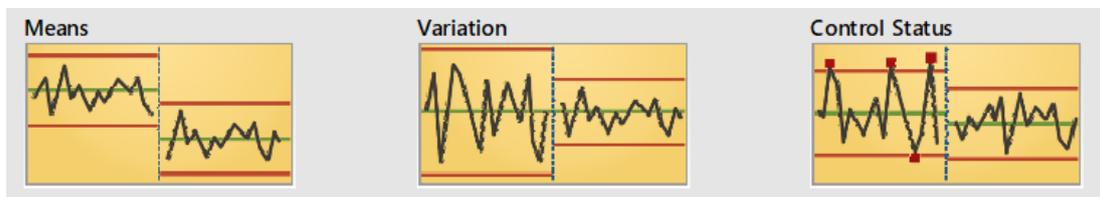


Figura 117. Valutazione differenze su linea centrale e limiti di controllo.

Before/After Xbar-R Chart della concentricità del foro

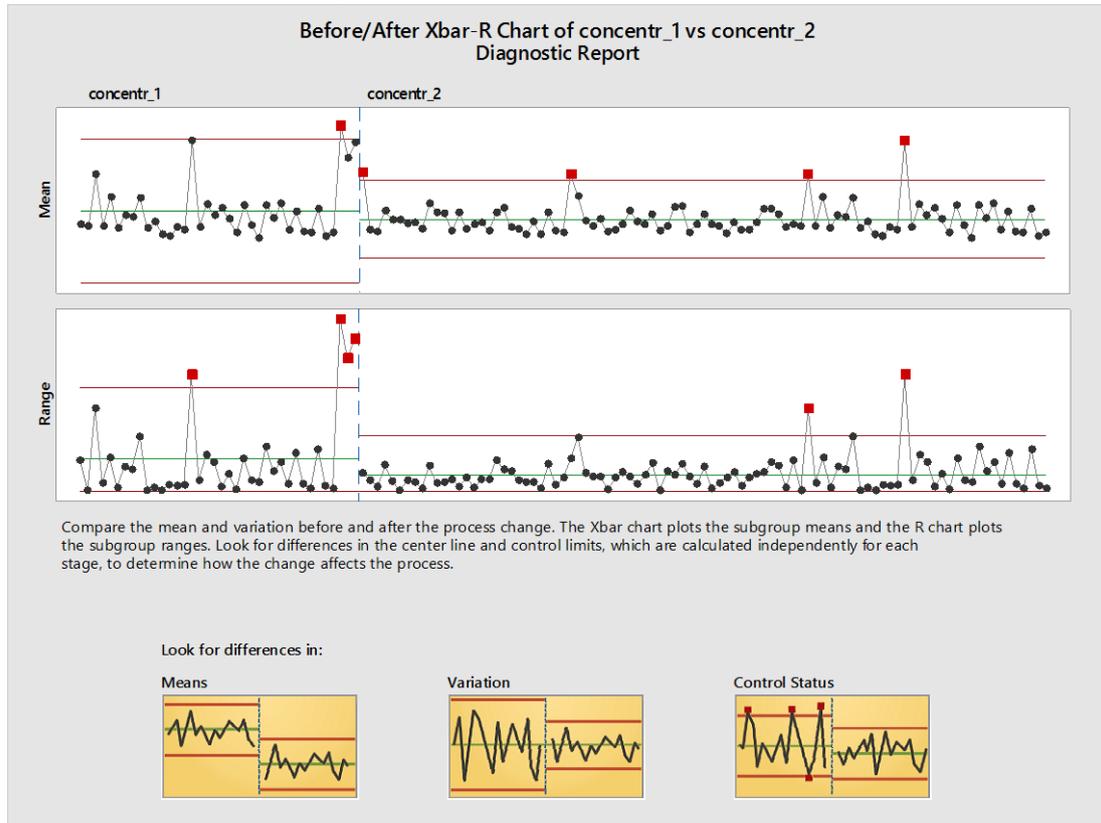


Figura 118. Before/After Xbar-R Chart della concentricità del foro: report diagnostico.

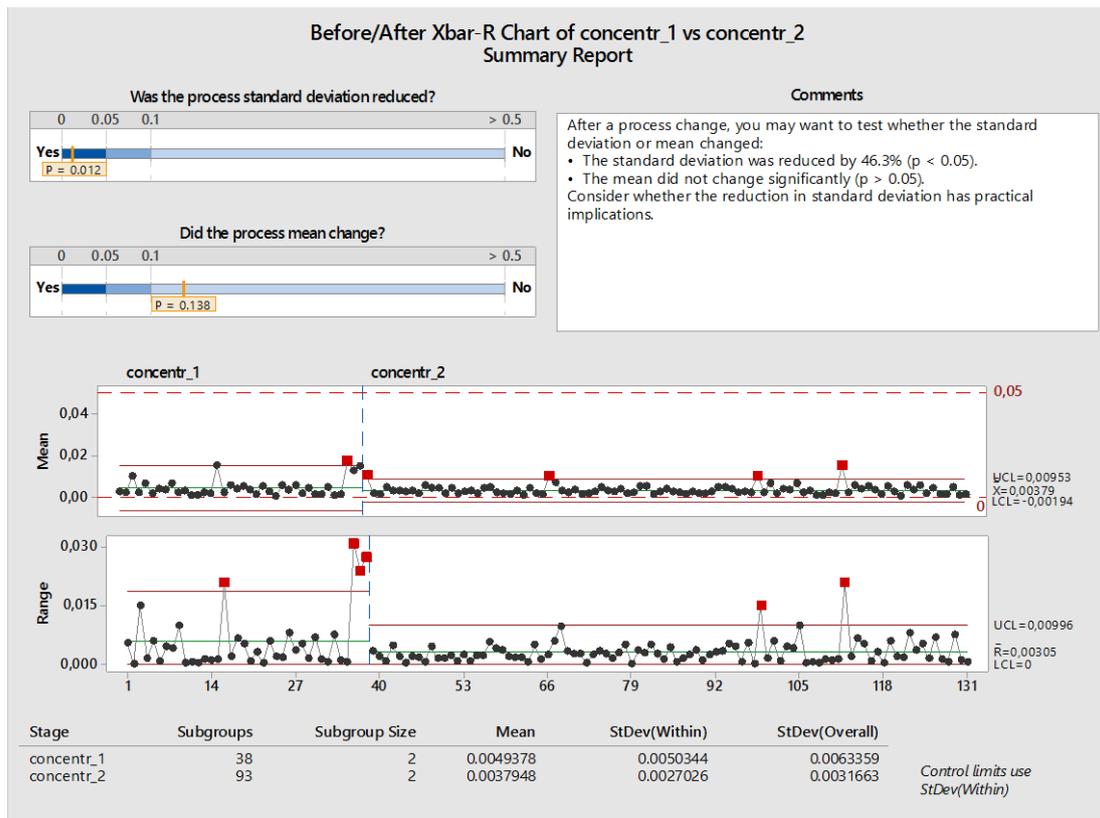


Figura 119. *Before/After Xbar-R Chart* della concentricità del foro: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard si è ridotta del 46.3%.
- La media non è cambiata significativamente.

La riduzione della deviazione standard non ha implicazioni pratiche.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- I campioni fuori dal controllo statistico possono essere visti come casi isolati.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

Before/After I-MR Chart della conicità del foro

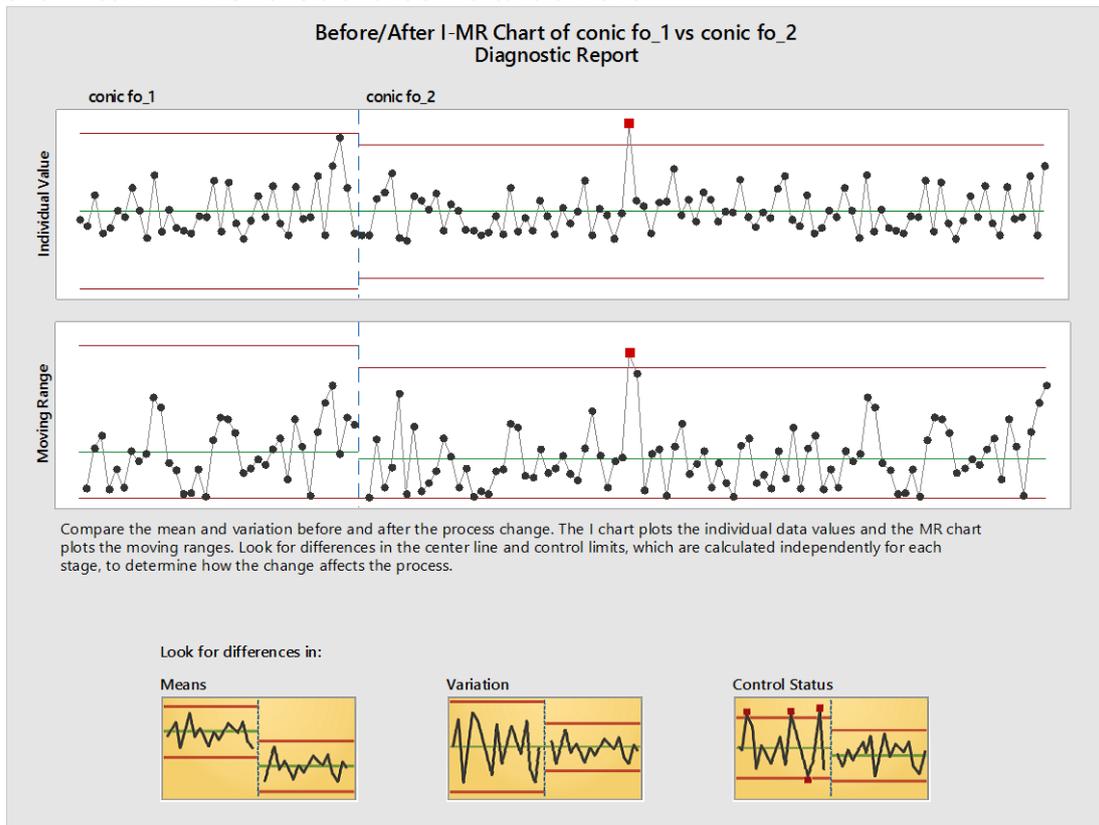


Figura 120. *Before/After I-MR Chart* della conicità del foro: report diagnostico.

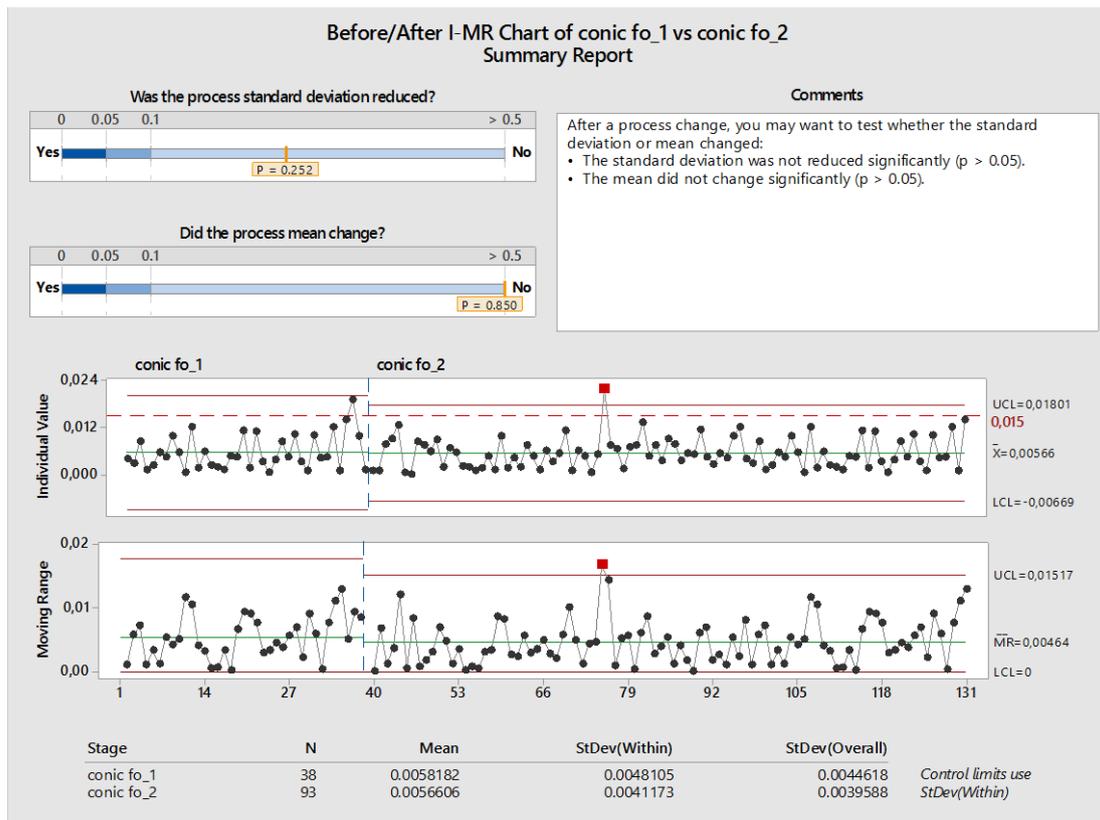


Figura 121. *Before/After I-MR Chart* della conicità del foro: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Il campione fuori dal controllo statistico può essere visto come caso isolato.
- Vi è un singolo campione che va fuori dagli estremi di tolleranza, quindi può essere visto come un caso isolato.

Before/After I-MR Chart del diametro dell'alesatura inferiore

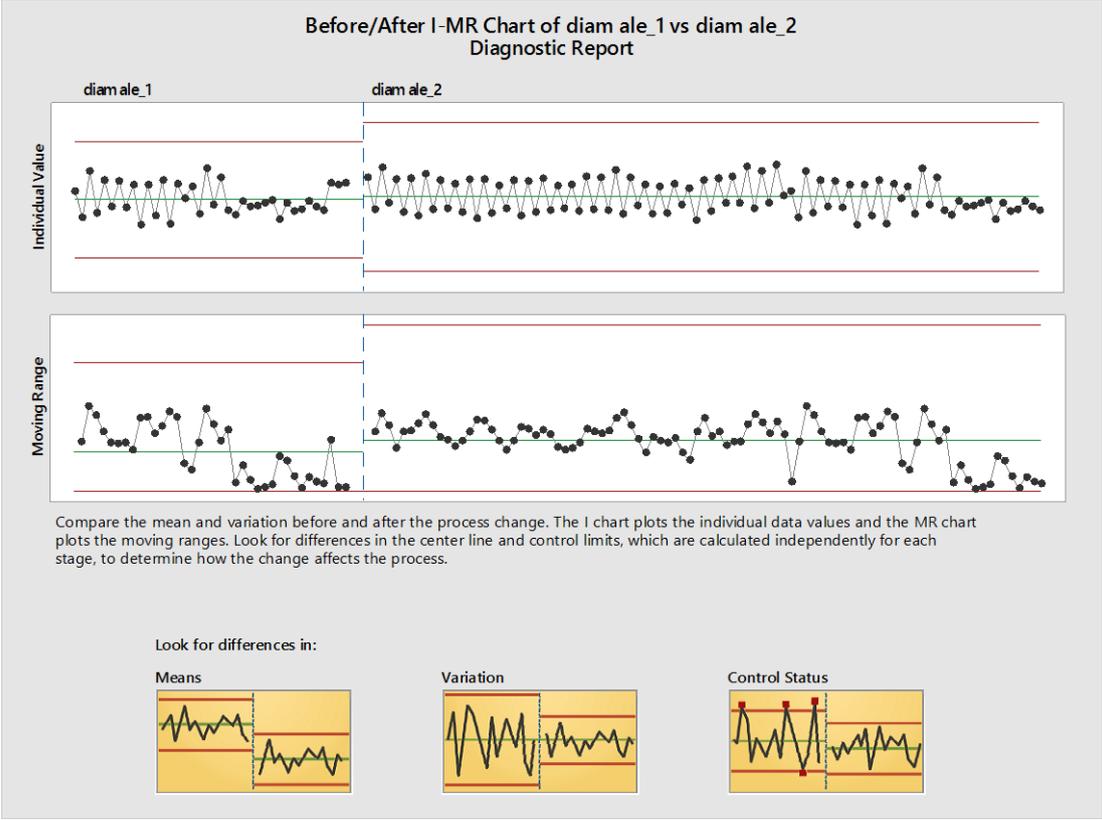


Figura 122. Before/After I-MR Chart del diametro dell'alesatura inferiore: report diagnostico.

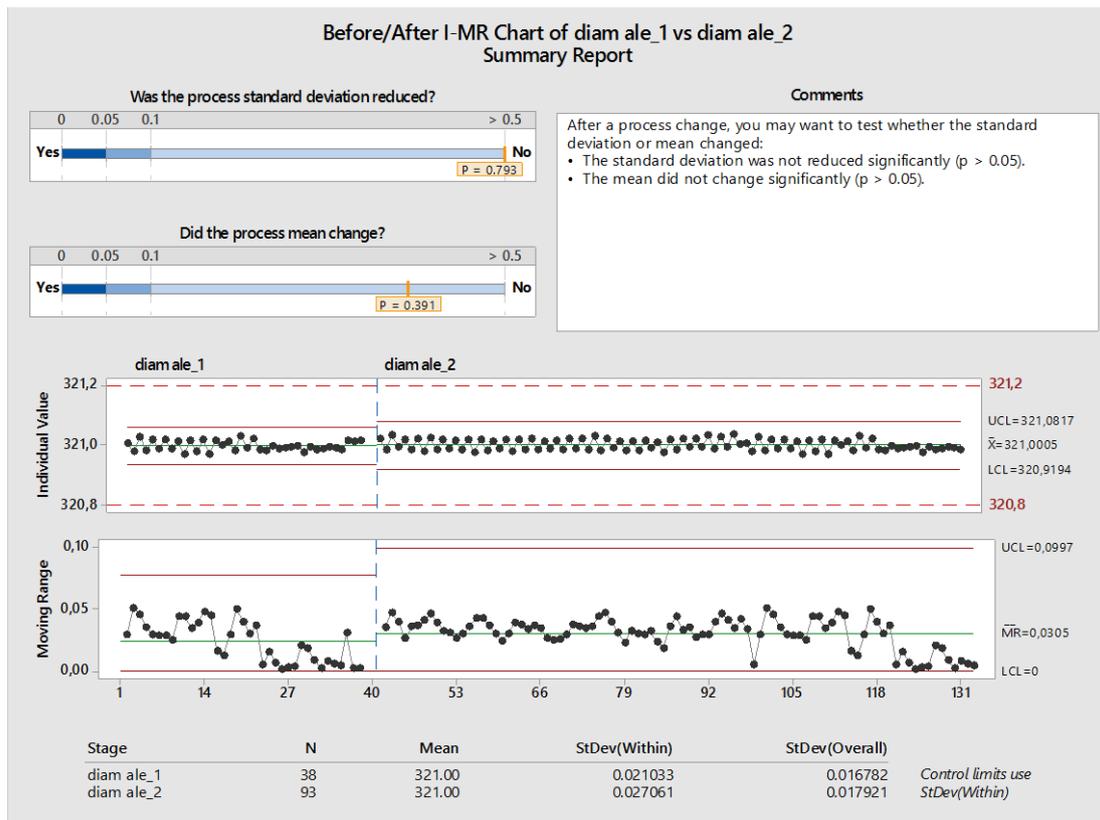


Figura 123. *Before/After I-MR Chart* del diametro dell'alesatura inferiore: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dal controllo statistico.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

Before/After I-MR Chart del diametro dell'alesatura superiore

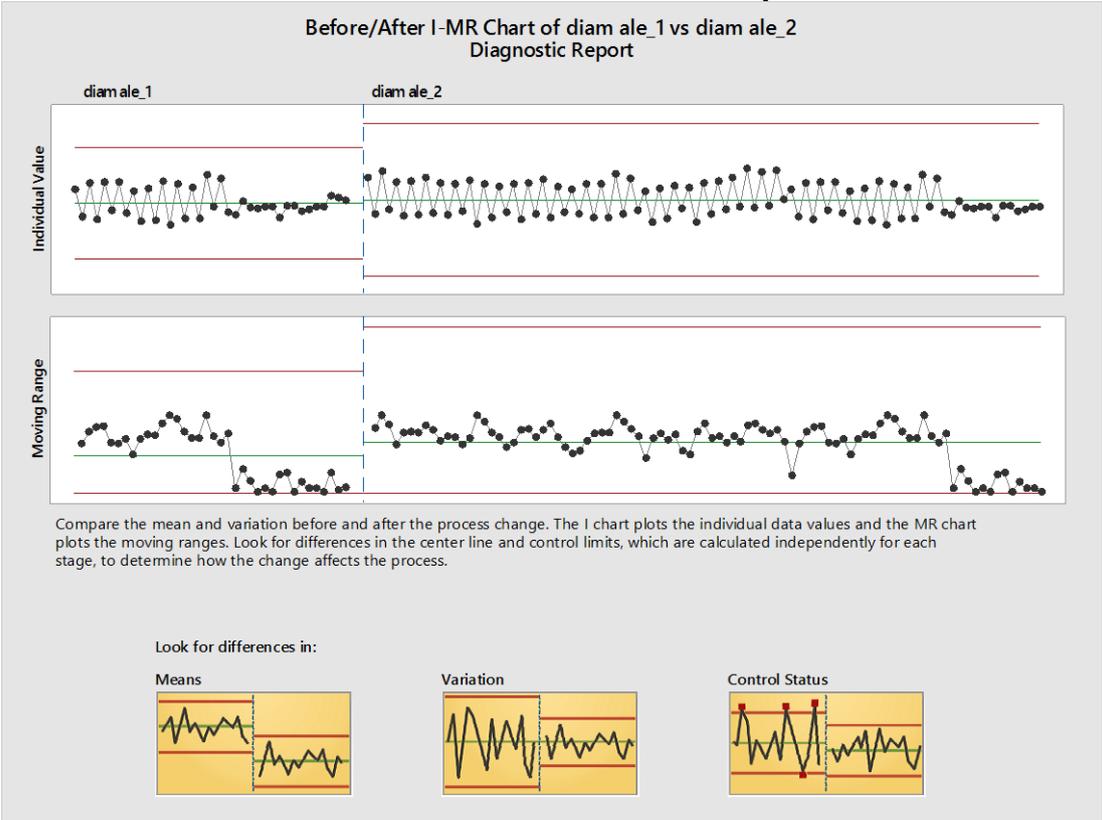


Figura 124. Before/After I-MR Chart del diametro dell'alesatura superiore: report diagnostico.

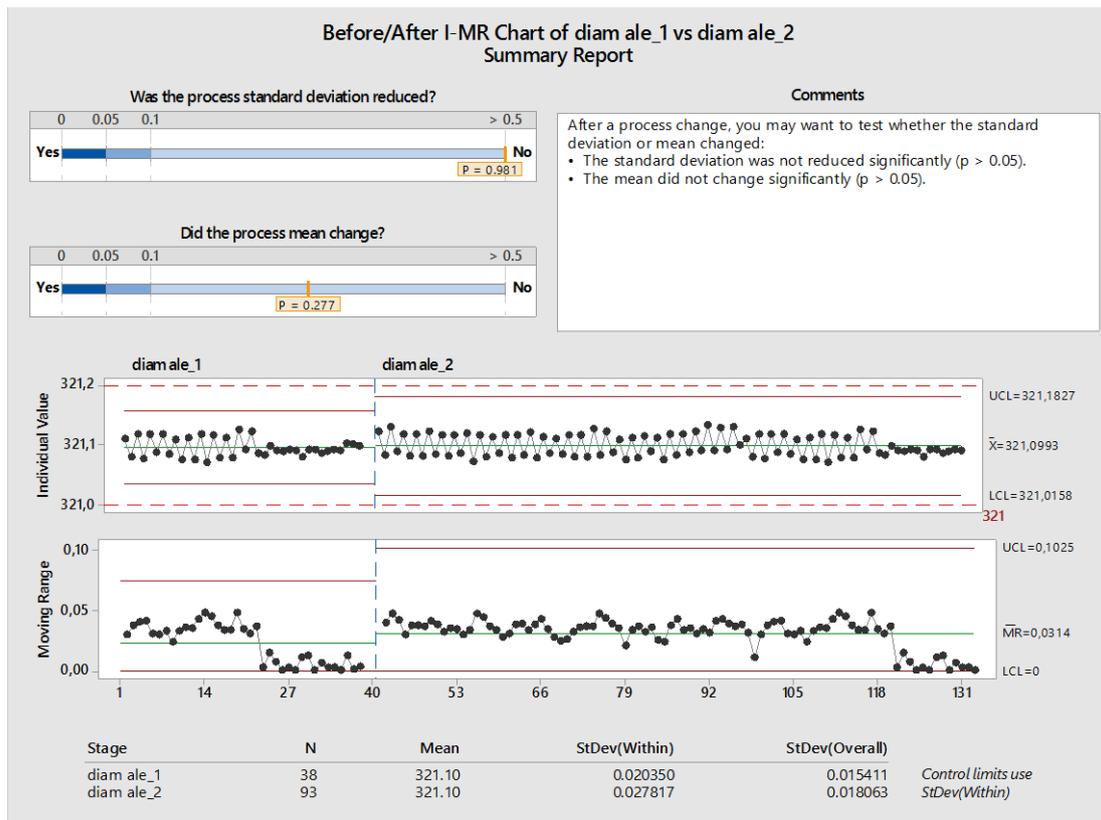


Figura 125. *Before/After I-MR Chart* del diametro dell'alesatura superiore: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dal controllo statistico.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

Before/After Xbar-R Chart del diametro del foro

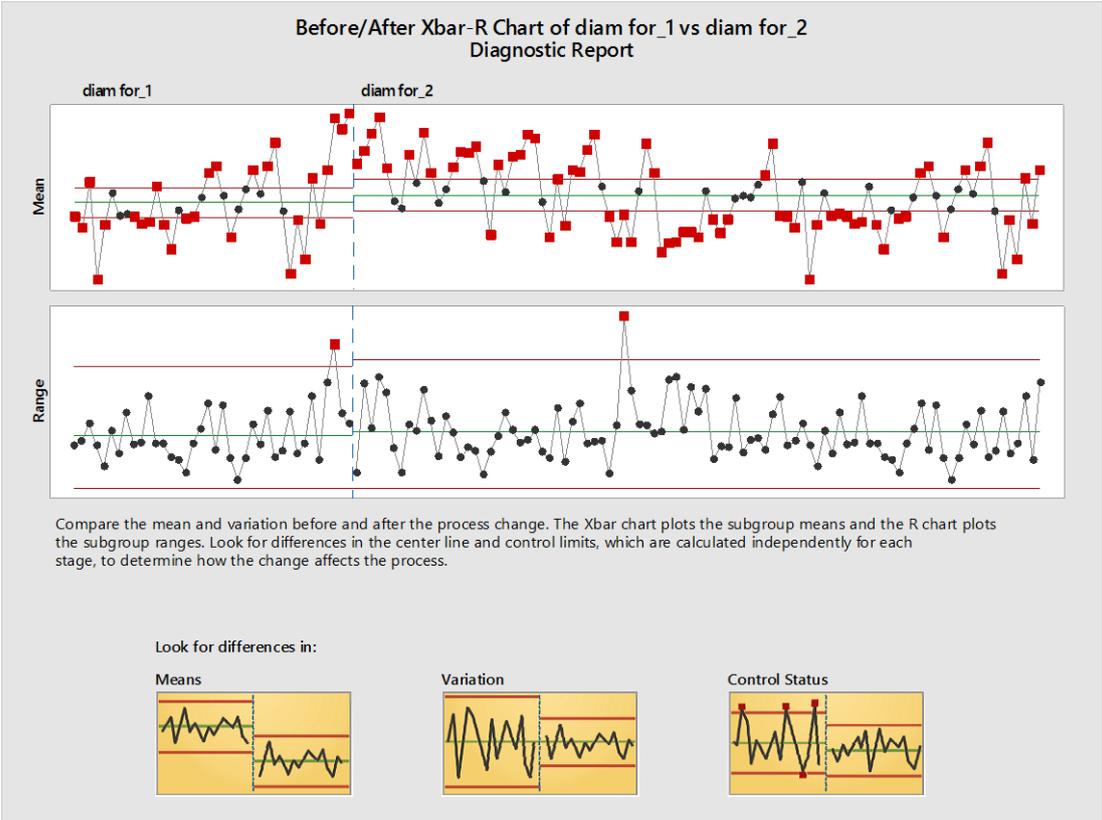


Figura 126. Before/After Xbar-R Chart del diametro del foro: report diagnostico.

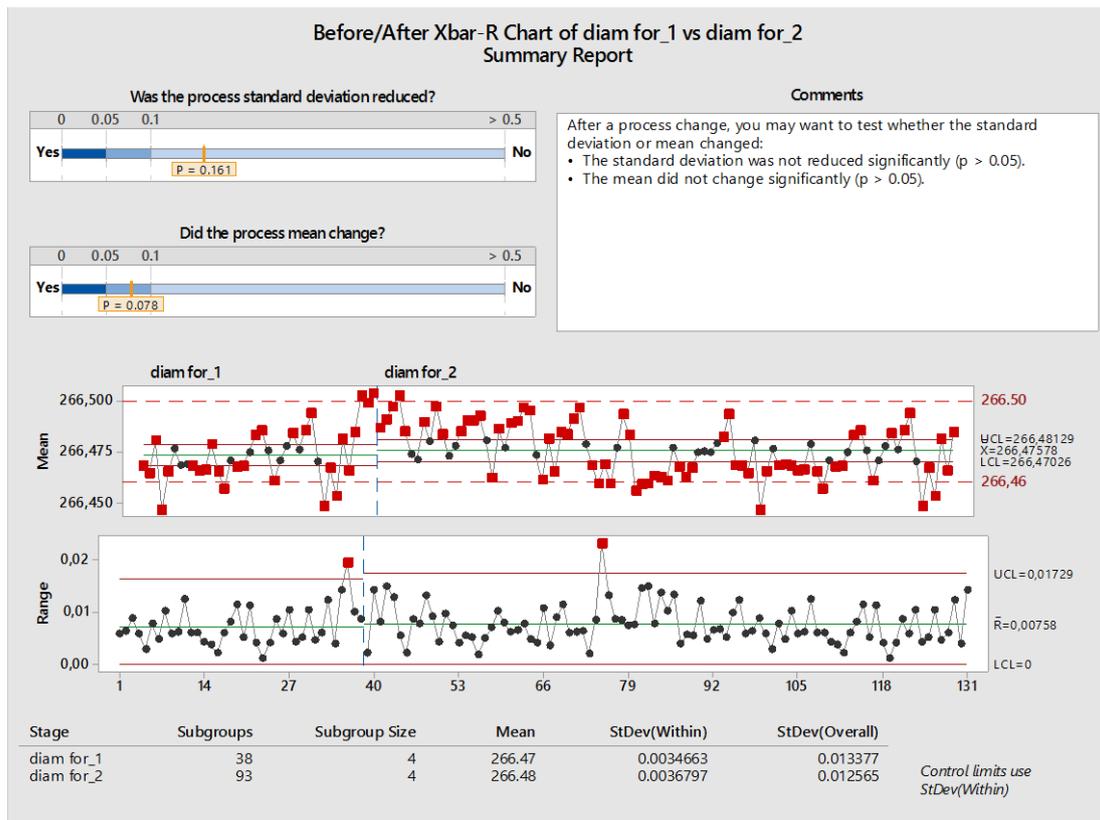


Figura 127. *Before/After Xbar-R Chart* del diametro del foro: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Essendo un foro misurato su quattro punti a differente profondità, a causa della geometria lavorata, si è proceduto ad effettuare una analisi ulteriore per ogni singola misurazione per rilevare eventuali anomalie o criticità rispetto allo storico dati.

Considerazioni sulle singole misure del diametro del foro

Before/After I-MR Chart of diametro foro (centro inferiore, punto 1)

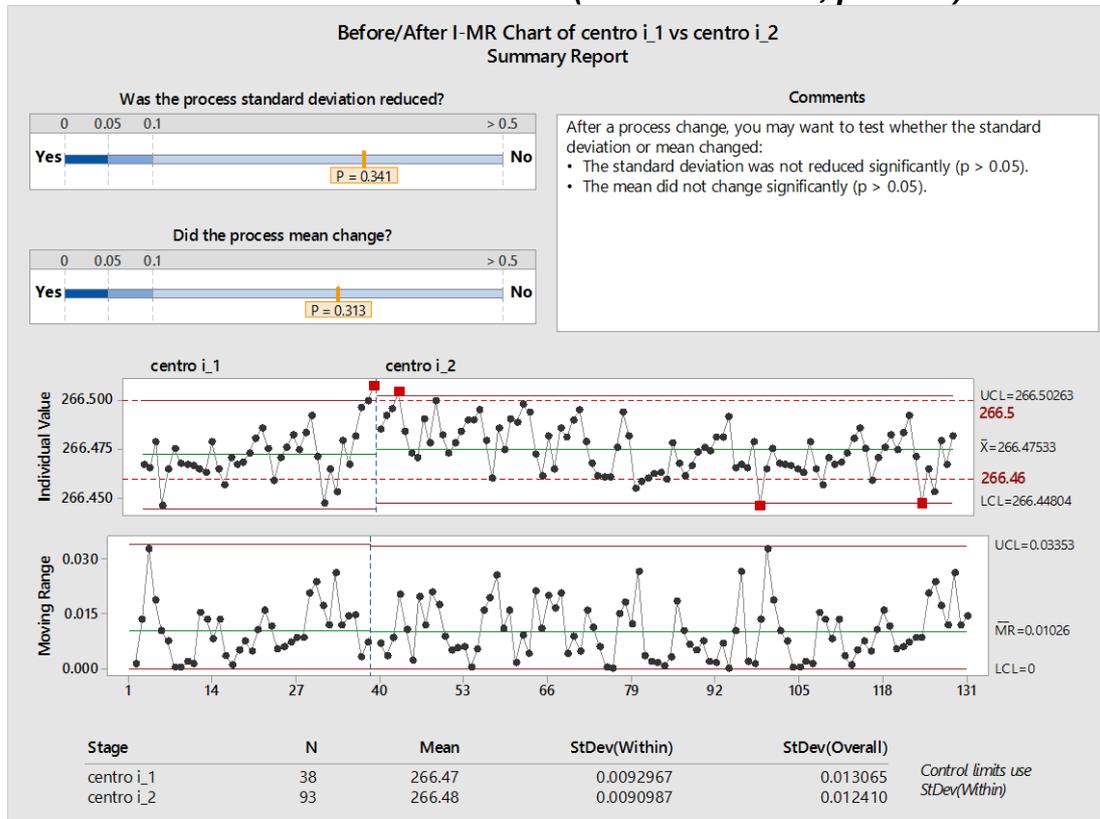


Figura 128. Before/After I-MR Chart of diametro foro (centro inferiore, punto 1): report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- I campioni fuori dal controllo statistico possono essere visti come casi isolati.
- Vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza, seppur di quantità esigue, ma ciò non può essere imputato alla variazione del processo poiché anche prima di tale variazione si verificava questo inconveniente.

Before/After I-MR Chart of diametro foro (centro superiore, punto 2)

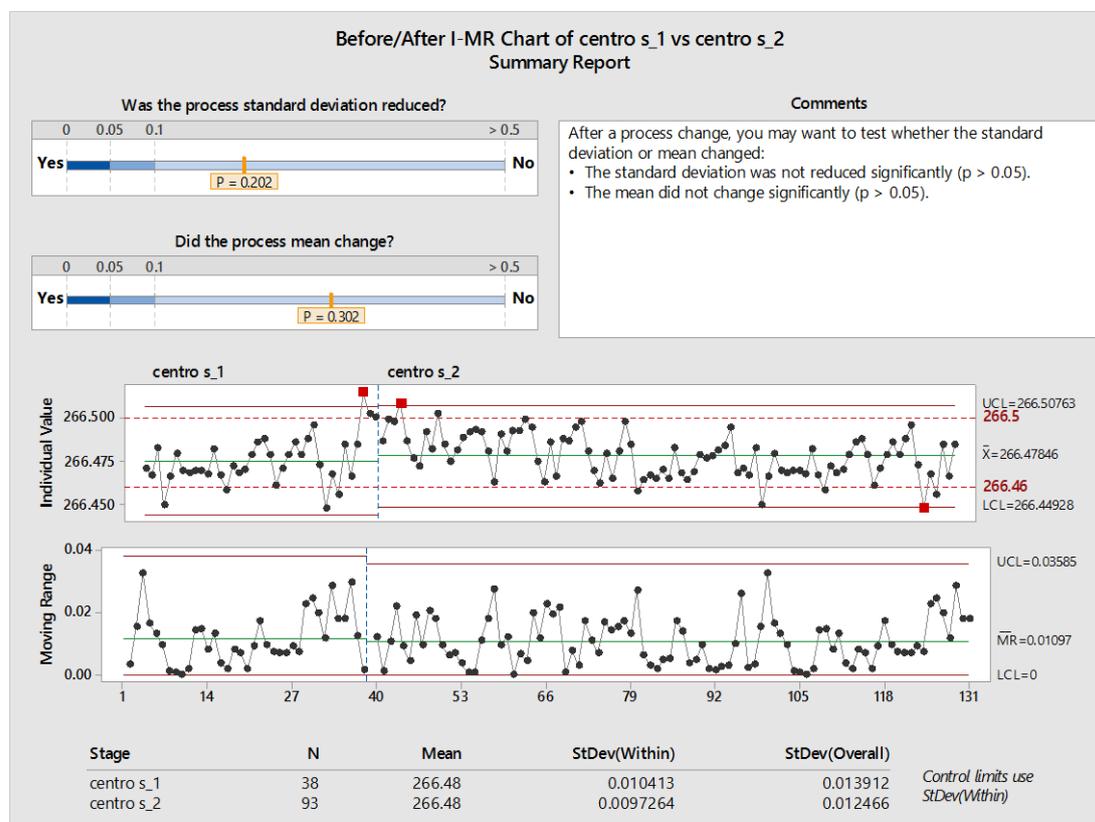


Figura 129. Before/After I-MR Chart of diametro foro (centro superiore, punto 2): report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- I campioni fuori dal controllo statistico possono essere visti come casi isolati.
- Vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza, seppur di quantità esigue, ma ciò non può essere imputato alla variazione del processo poiché anche prima di tale variazione si verificava questo inconveniente.

Before/After I-MR Chart of diametro foro (superiore, punto 3)

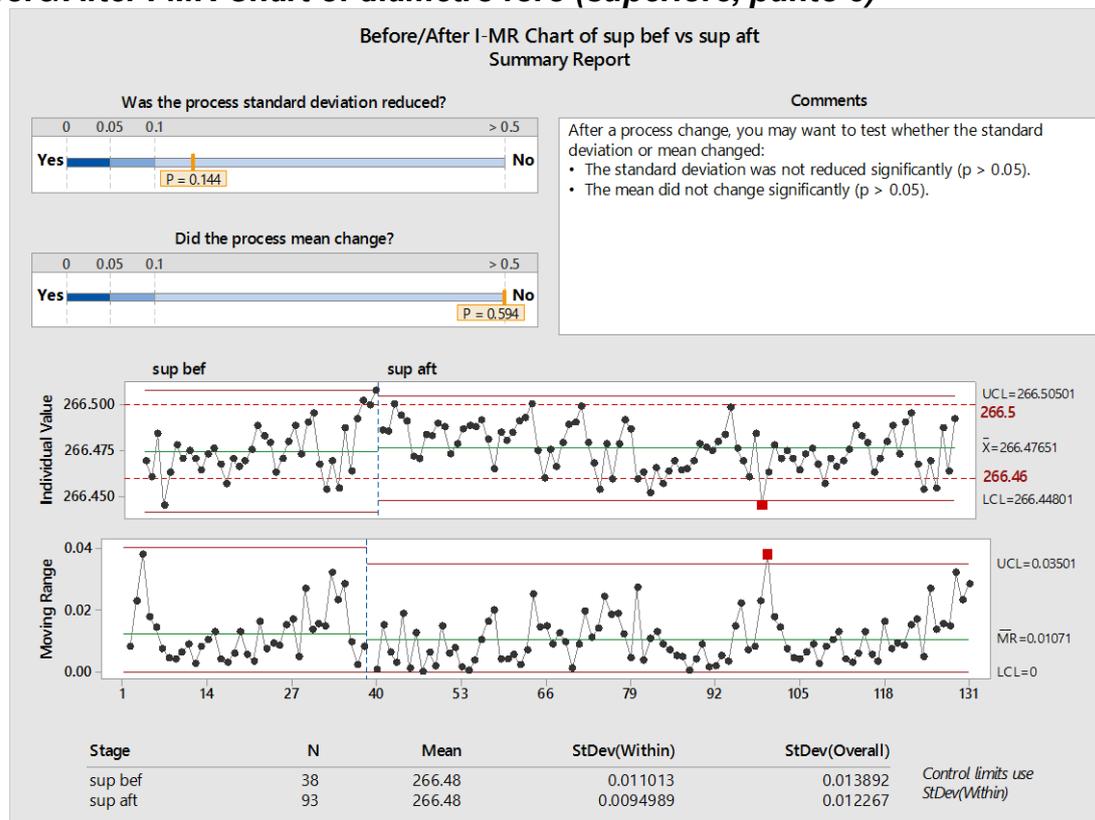


Figura 130. Before/After I-MR Chart of diametro foro (superiore, punto 3): report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Il campione fuori dal controllo statistico può essere visto come caso isolato.
- Vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza, seppur di quantità esigue, ma ciò non può essere imputato alla variazione del processo poiché anche prima di tale variazione si verificava questo inconveniente.

Before/After I-MR Chart del diametro del foro (inferiore, punto 4)

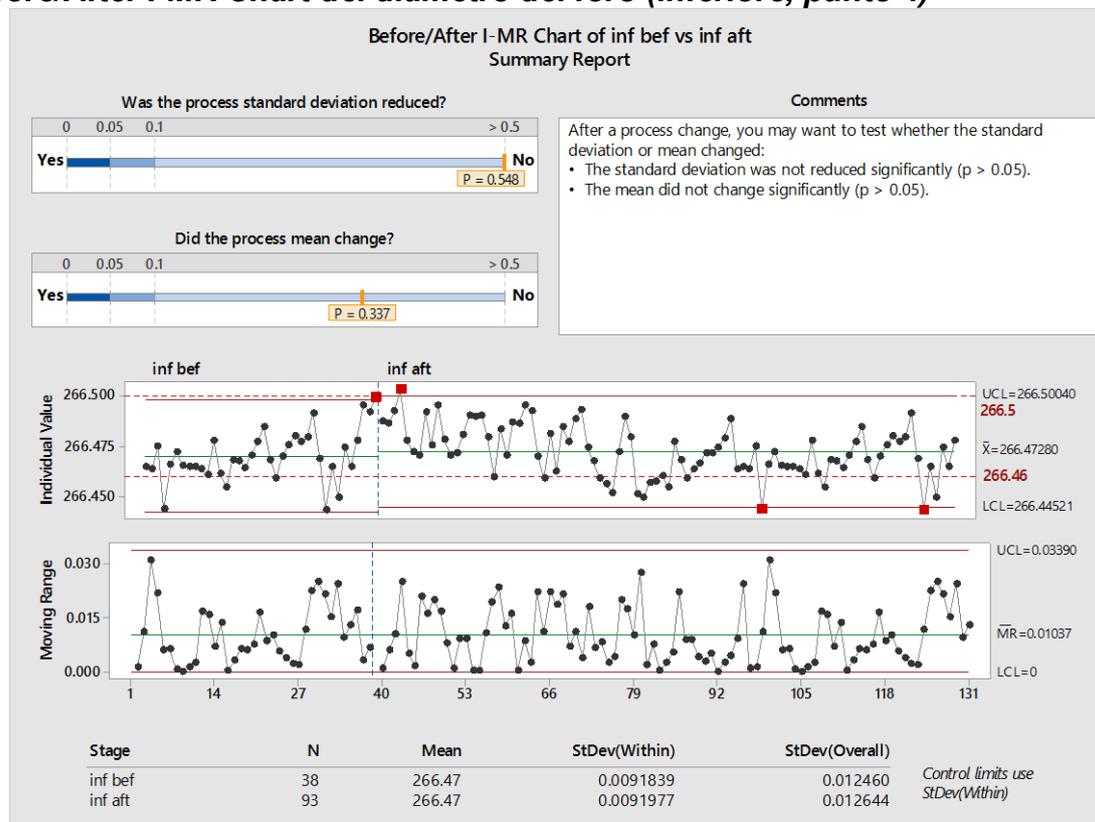


Figura 131. Before/After I-MR Chart del diametro del foro (inferiore, punto 4): report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- I campioni fuori dal controllo statistico possono essere visti come casi isolati.
- Vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza, seppur di quantità esigue, ma ciò non può essere imputato alla variazione del processo poiché anche prima di tale variazione si verificava questo inconveniente.

Before/After I-MR Chart della perpendicolarità del foro

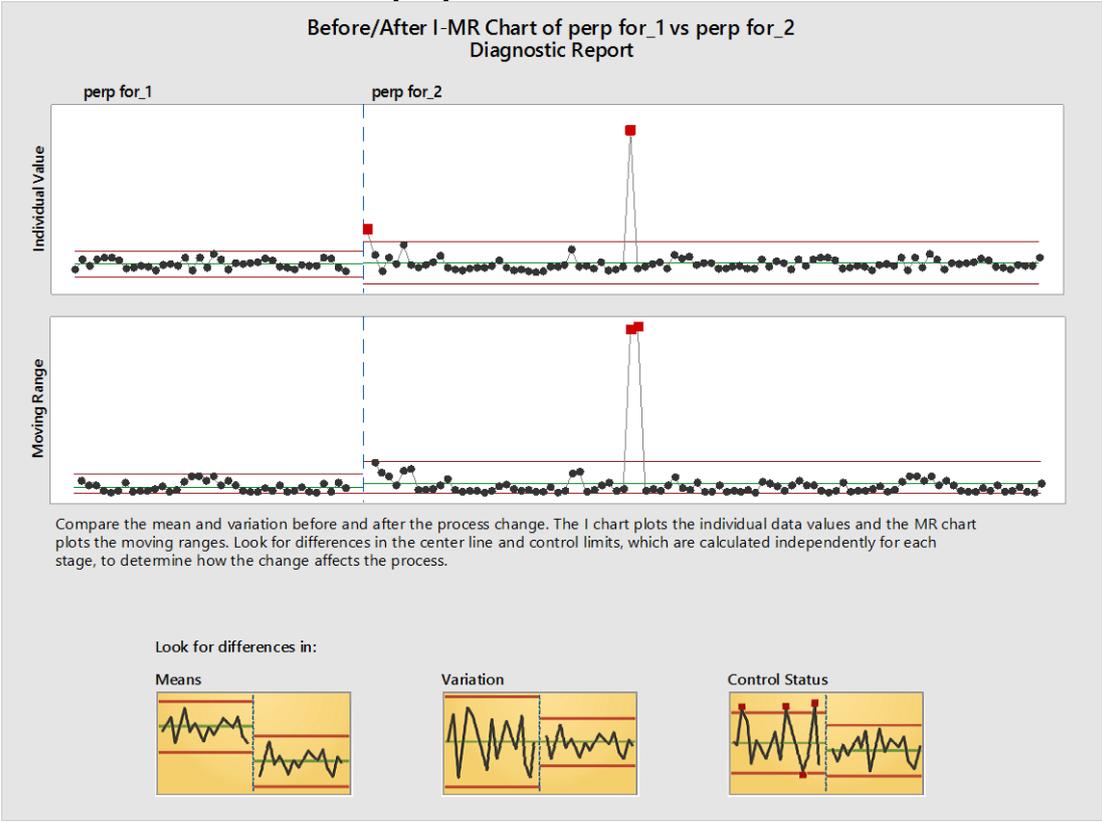


Figura 132. Before/After I-MR Chart della perpendicolarità del foro: report diagnostico.

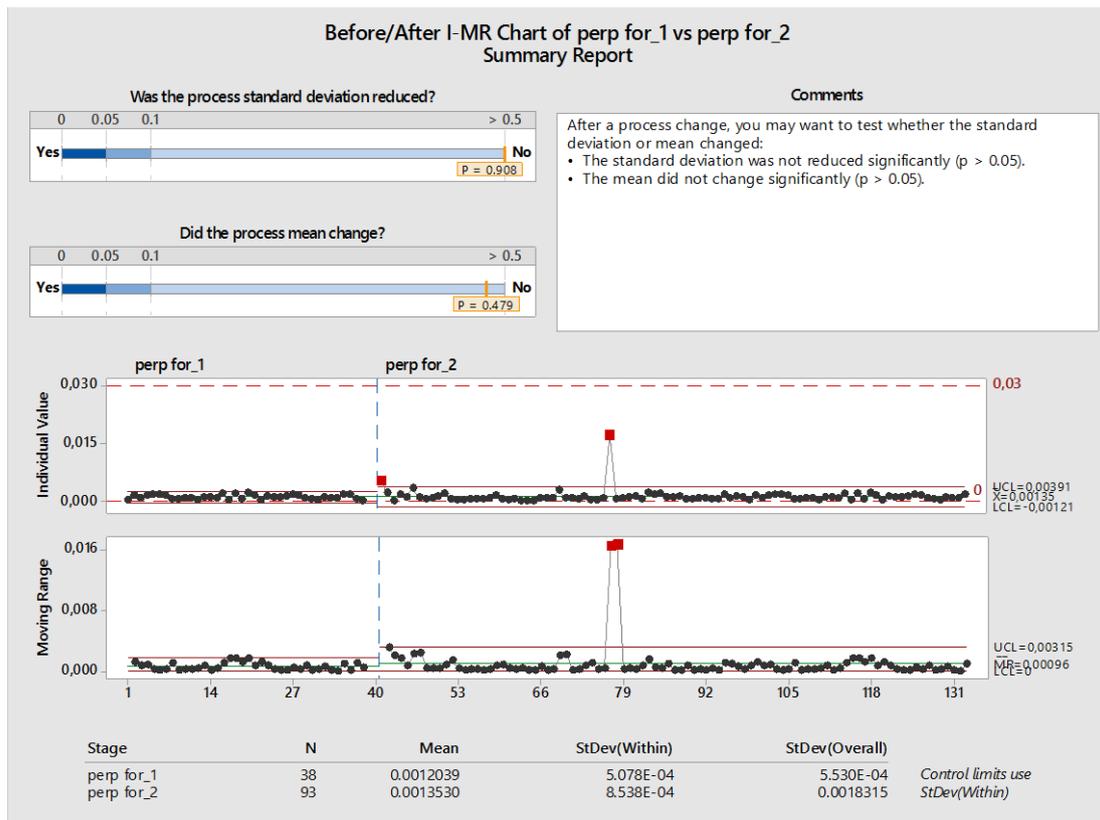


Figura 133. *Before/After I-MR Chart* della perpendicolarità del foro: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Il campione fuori dal controllo statistico può essere visto come un caso isolato.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

Before/After I-MR Chart della rotondità dell'alesatura inferiore

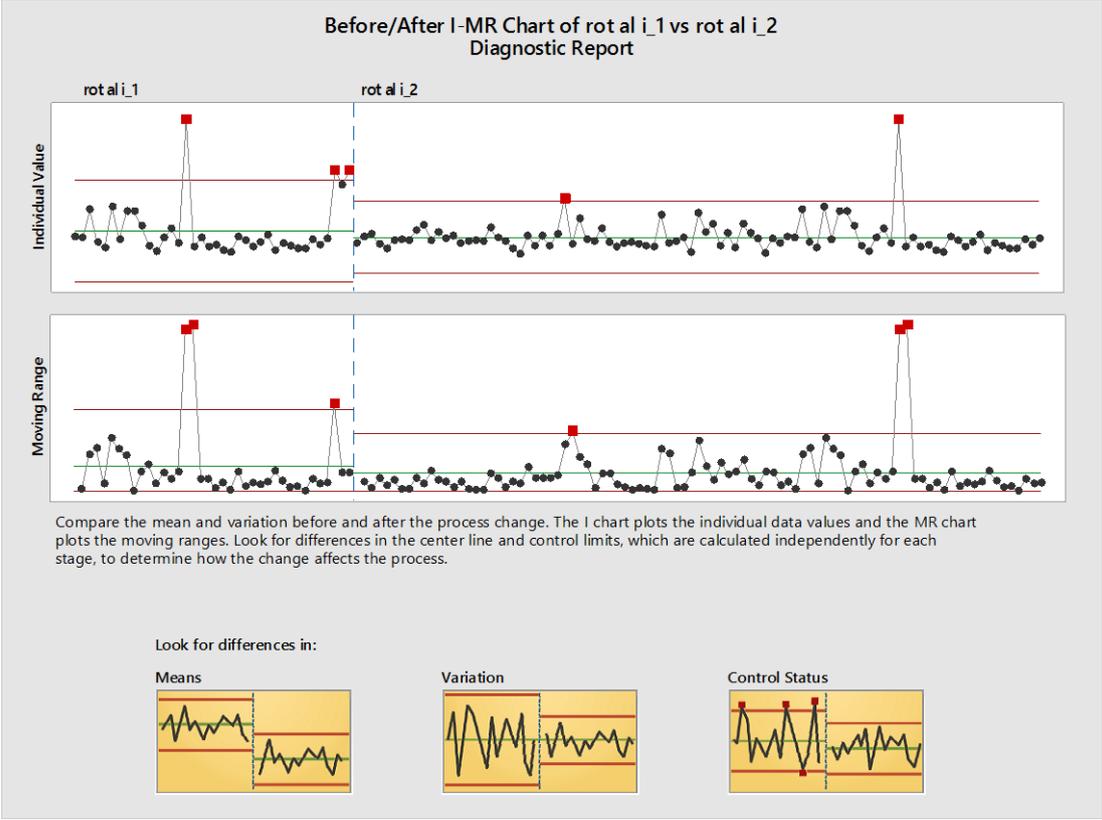


Figura 134. *Before/After I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report diagnostico.

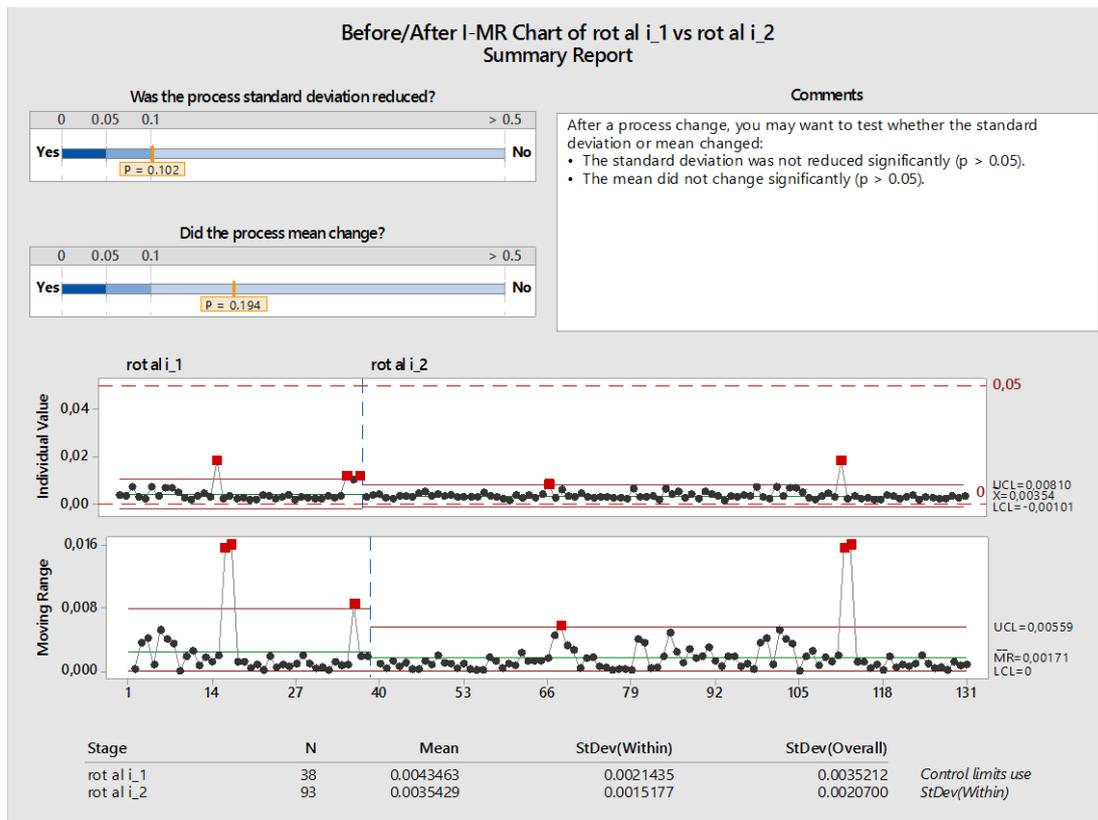


Figura 135: *Before/After I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura inferiore: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Il campione fuori dal controllo statistico può essere visto come un caso isolato.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

Before/After I-MR Chart della rotondità dell'alesatura superiore

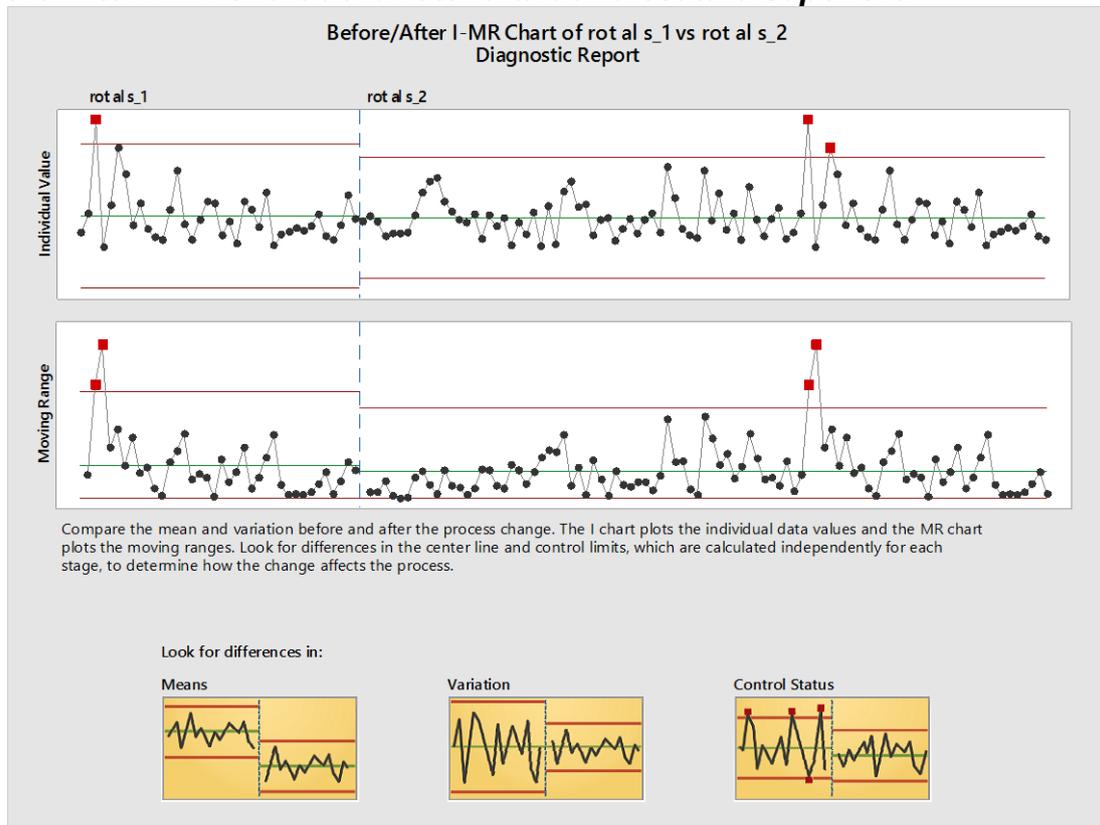


Figura 136. *Before/After I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura superiore: report diagnostico.

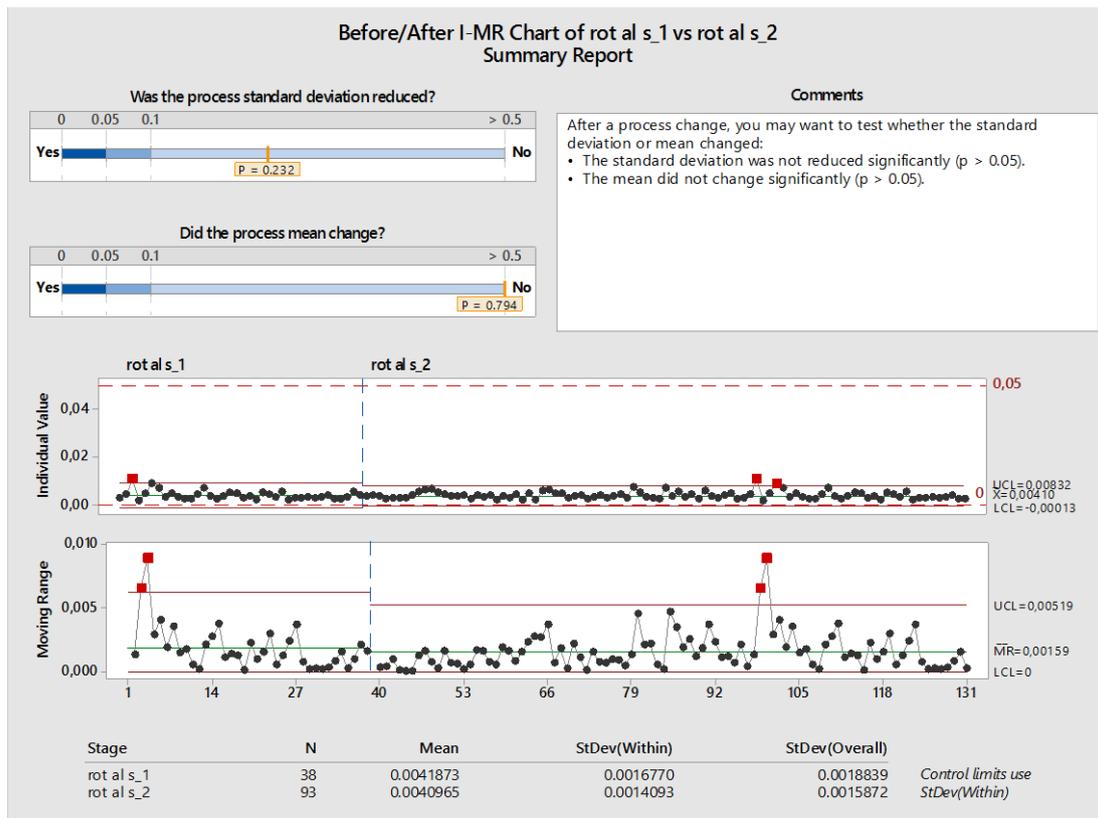


Figura 137. *Before/After I-MR Chart* della rotondità dell'alesatura superiore: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- I campioni fuori dal controllo statistico possono essere visti come casi isolati.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

Before/After I-MR Chart della rotondità del foro

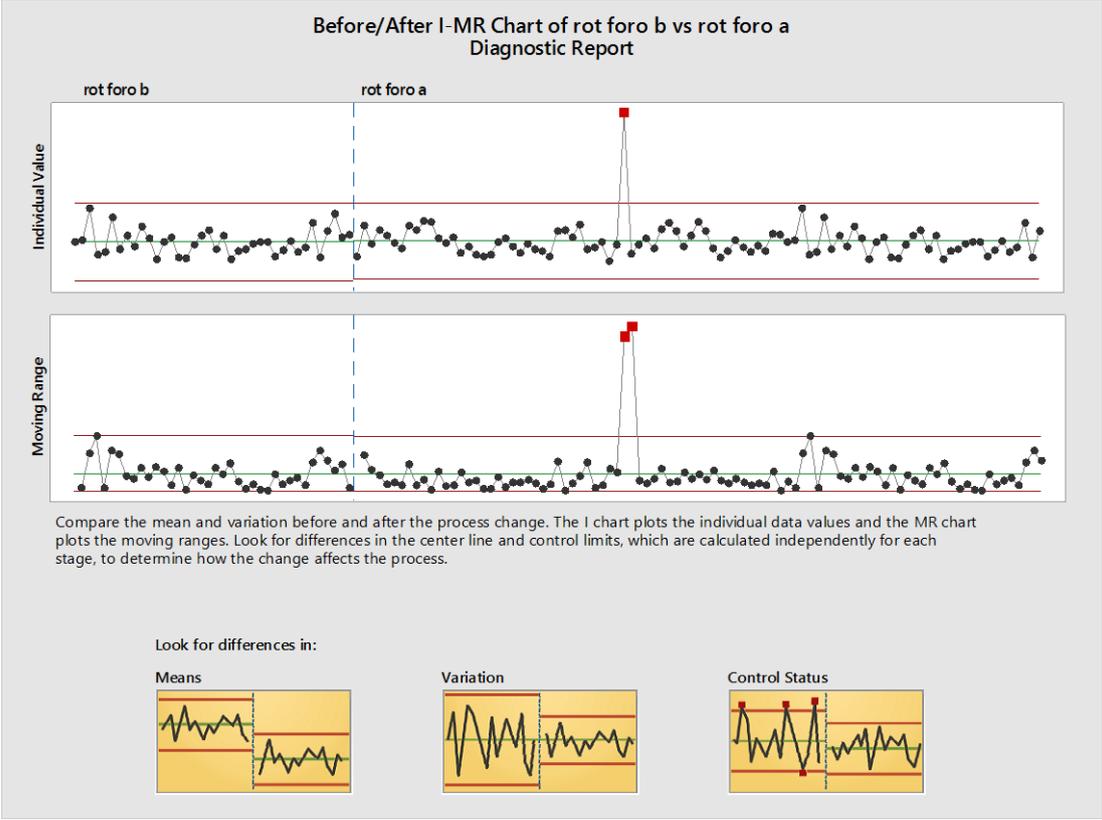


Figura 138. Before/After I-MR Chart della rotondità del foro: report diagnostico.

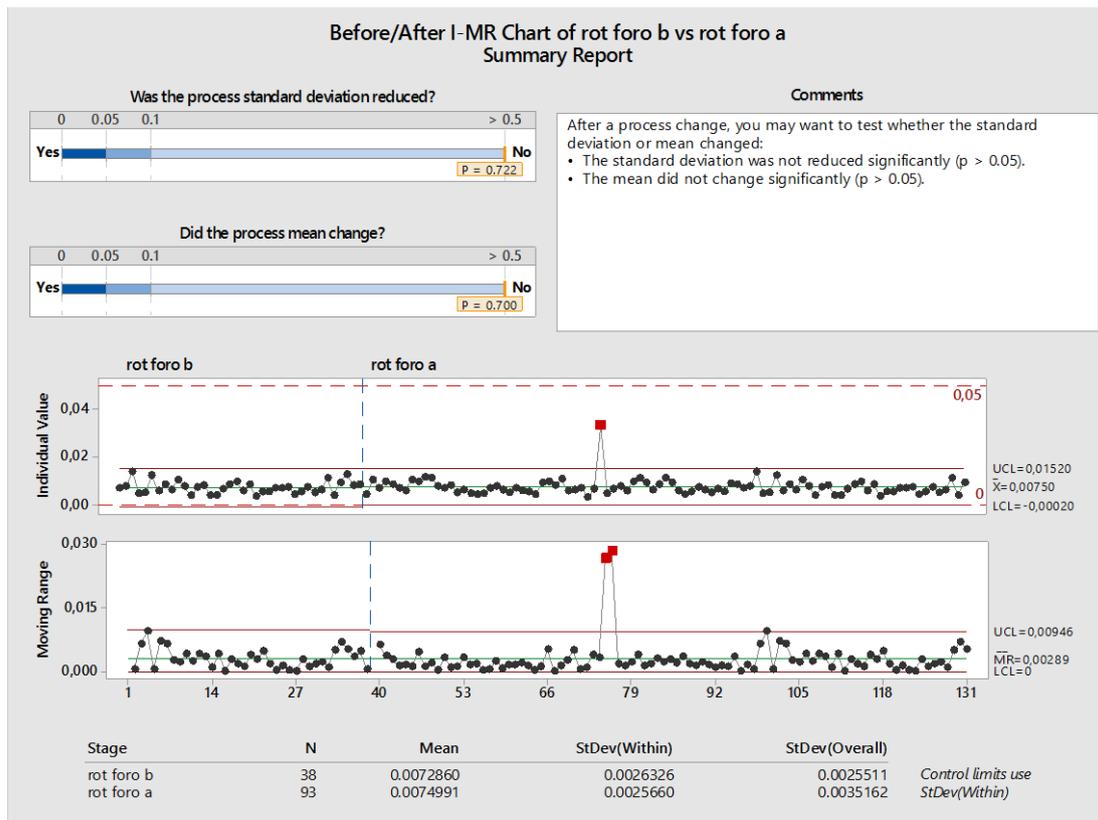


Figura 139. *Before/After I-MR Chart* della rotondità del foro: report sommario.

Considerazioni su deviazione standard e media:

- La deviazione standard non è cambiata significativamente.
- La media non è cambiata significativamente.

Considerazioni su stabilità del processo, controllo statistico ed eventuali fuori tolleranza:

- Non è variata la stabilità del processo di controllo.
- Il campione fuori dal controllo statistico può essere visto come un caso isolato.
- Non vi sono campioni che vanno fuori dagli estremi di tolleranza.

12. Considerazioni finali

Il presente lavoro di tesi ha permesso di esaminare la lavorazione del componente oggetto di studio, dopo averne effettuato la scelta tra le differenti da esso subite all'interno dell'intero processo di tornitura, da più punti di vista:

- Variazione della durata della lavorazione effettuata.
- Caratterizzazione e rilevamento dell'usura indotta sui singoli inserti utilizzati e relative analisi di regressione, ai fini dell'identificazione del valor minimo di essa.
- Valutazione della variazione indotta dai parametri sulle dimensioni del componente, e sul relativo controllo statistico di processo.

Il tutto in relazione ai dati preesistenti rispetto all'esecuzione delle prove, per le quali sono stati variati dei parametri di processo, la cui identificazione è stata effettuata, principalmente, in relazione ai limiti dei materiali di pezzo ed utensile e della tipologia di serraggio del pezzo in macchina, e la cui suddivisione nelle single prove è stata effettuata mediante un piano di esecuzione degli esperimenti definito in precedenza.

Inoltre, dopo ciò, è stata effettuata l'estensione dei parametri considerati ottimali, ai fini della minimizzazione dell'usura e dell'influenza sul componente, ad un numero superiore di pezzi per valutarne l'effettiva ripetibilità rispetto al singolo campione osservato nello svolgimento del piano considerato, analizzando principalmente il controllo statistico del processo di controllo dimensionale.

Dopo tutto l'iter sopra riassunto, si è giunti al risultato che la variazione di parametri imposta che garantisce il valor minimo dell'usura dell'inserto, comportante una riduzione in termini temporali della durata, della singola lavorazione all'interno dell'intero processo di tornitura, pari al 41% rispetto al valore precedente, è divenuta il corrente standard per la lavorazione considerata del componente esaminato.

Dato che tale lavoro è stato effettuato su due componenti aventi geometria simile, in seguito verrà testata anche l'estensione dei parametri di processo ed il relativo controllo statistico del processo di controllo dimensionale seguente, ad un intero lotto del componente *A*.

Indice delle figure

Figura 1. Moti caratteristici della lavorazione di tornitura.	7
Figura 2. Tipologie di operazioni di tornitura.	9
Figura 3. Elementi caratteristici utensile.	11
Figura 4. Angoli di: sezione normale, profilo e registrazione.	12
Figura 5. Geometria dell'utensile: vista 3D.	12
Figura 6. Angolo di spoglia inferiore principale.	13
Figura 7. Angolo di spoglia superiore: lavorazione di materiali di durezza differente.	14
Figura 8. Angolo di spoglia superiore: positivo e negativo.	15
Figura 9. Angolo ψ del tagliente principale: influenza sulle forze di taglio.	15
Figura 10. Angolo di inclinazione λ : deflusso del truciolo.	16
Figura 11. Angolo di inclinazione λ : positivo e negativo.	17
Figura 12. Geometria per calcolo della rugosità teorica.	18
Figura 13. Durezza Vickers dei materiali per utensili in funzione della resistenza a flessione.	21
Figura 14. Centro di lavorazione ad asse orizzontale.	23
Figura 15. Centro di lavorazione ad asse verticale.	23
Figura 16. Esempio lavorazione CNC, identificazione assi di riferimento, geometria ed entità della lavorazione da effettuare.	25
Figura 17. Identificazione delle forme più comuni di usura.	29
Figura 18. Formazione dei meccanismi di usura nei diversi materiali.	31
Figura 19. Grandezze da utilizzare per la rappresentazione delle forme di usura considerate.	32
Figura 20. Andamento della durata dell'utensile in funzione della velocità di taglio, per diversi valori dell'usura sul fianco VB e dell'usura in cratere KT/KM	33
Figura 21. Andamento della durata dell'utensile in funzione della velocità di taglio.	34
Figura 22. Manifestazione dei meccanismi di usura su di un inserto tondo.	35
Figura 23. Tabella <i>ANOVA</i> per il test per la verifica della significatività dell'insieme dei coefficienti di regressione nel modello di regressione multipla con $p=2$ variabili esplicative.	39
Figura 24. Esempio carta di controllo.	42
Figura 25. Applicazioni di utilizzo del centro di lavoro impiegato.	49
Figura 26. Estratto scheda tecnica del centro di lavoro impiegato.	50
Figura 27. Sistema microscopio digitale.	51
Figura 28. Videata software proprietario per acquisizione e post-process delle immagini.	52
Figura 29. Estratto scheda tecnica microscopio digitale.	53
Figura 30. Immagine rappresentativa della macchina CMM 3D utilizzata.	54
Figura 31. Descrizione del sistema.	55
Figura 32. Caratteristiche della macchina: accuratezza.	56
Figura 33. Caratteristiche della macchina: dimensioni relative alla macchina.	56
Figura 34. Caratteristiche della macchina: caratteristiche tecniche e condizioni ambiente.	57
Figura 35. Geometria componente, con caratteristiche dimensionali evidenziate.	58
Figura 36. Geometria componente, vista isometrica.	59
Figura 37. Geometria componente, vista in sezione.	59
Figura 38. Simulazione 3D della lavorazione.	60
Figura 39. Simulazione del percorso utensile relativo agli spostamenti del suo centro.	61

Figura 40. Geometria componente, identificazione superfici da lavorare.	61
Figura 41. Riferimento del materiale in esame rispetto ai differenti costruttori.	62
Figura 42. Composizione chimica del materiale.	63
Figura 43. Ulteriori specifiche relative al materiale.	63
Figura 44. Proprietà fisiche materiale: coefficienti.	64
Figura 45. Proprietà fisiche materiale: andamento durezza al variare della temperatura.	64
Figura 46. Foto e geometria dell'utensile, dal sito del costruttore.	65
Figura 47. Andamento della velocità di taglio, al variare dello spessore massimo del truciolo.	67
Figura 48. Valori di partenza per lavorazione materiali differenti, forniti dal costruttore.	67
Figura 49. Scelta del numero dei livelli del design in funzione del numero di fattori.	69
Figura 50. Scelta del numero di prove, dopo aver identificato il numero di fattori.	69
Figura 51. Assegnazione dei fattori e dei relativi valori.	70
Figura 52. Residuo sommario <i>MINITAB</i>	70
Figura 53. Andamento durata lavorazione, al variare della velocità di taglio, per diversi valori dell'avanzamento.	72
Figura 54. Andamento durata lavorazione, al variare della velocità di taglio, per diversi valori dell'avanzamento, dopo aver variato il piano degli esperimenti.	74
Figura 55. Usura sul fianco.	75
Figura 56. Formazione di intaglio.	76
Figura 57. Andamenti dei V_b (<i>max e min</i>) al variare del numero di prova/inserto.	77
Figura 58. Andamenti dei V_n (<i>max e min</i>) al variare del numero di prova/inserto.	77
Figura 59. Individuazione tipologia di analisi su <i>MINITAB</i>	79
Figura 60. Scelta delle variabili su <i>MINITAB</i>	79
Figura 61. Scelta del livello di confidenza per gli intervalli.	80
Figura 62. Scelta dei grafici da visualizzare.	80
Figura 63. Residuo analitico da analisi di regressione lineare multipla.	81
Figura 64. Differenti grafici dei residui.	84
Figura 65. Andamento tipico.	85
Figura 66. Pattern osservabili. Rispettivamente da sinistra verso destra: variazione o shift, ciclo, tendenza.	86
Figura 67. Grafico del contorno di V_n <i>min</i>	87
Figura 68. Grafico della superficie di V_n <i>min</i>	89
Figura 69. Regressione lineare multipla di V_n <i>min</i> : report di costruzione del modello.	90
Figura 70. Regressione lineare multipla di V_n <i>min</i> : report sommario.	91
Figura 71. Regressione lineare multipla di V_n <i>min</i> : report di predizione ed ottimizzazione.	92
Figura 72. Residuo analitico da analisi di regressione lineare semplice.	93
Figura 73. Differenti grafici dei residui.	94
Figura 74. Regressione lineare di V_n <i>min</i> : grafico di predizione.	95
Figura 75. Regressione lineare di V_n <i>min</i> : report di selezione del modello.	96
Figura 76. Regressione lineare di V_n <i>min</i> : report sommario.	97
Figura 77. Esempio di <i>Xbar Chart</i>	99
Figura 78. Esempio di <i>R-Chart</i>	100
Figura 79. Esempio di <i>I-MR Chart</i>	101
Figura 80. <i>Xbar-R Chart</i> della concentricità del foro: report di stabilità.	105

Figura 81. <i>Xbar-R Chart</i> della concentricità del foro: report sommario.	106
Figura 82. <i>I-MR Chart</i> della conicità del foro: report di stabilità.	107
Figura 83. <i>I-MR Chart</i> della conicità del foro: report sommario.	108
Figura 84. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura inferiore: report di stabilità.	109
Figura 85. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura inferiore: report sommario.	110
Figura 86. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura superiore: report di stabilità.	111
Figura 87. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura superiore: report sommario.	112
Figura 88. <i>Xbar-R Chart</i> del diametro del foro: report di stabilità.	113
Figura 89. <i>Xbar-R Chart</i> del diametro del foro: report sommario.	114
Figura 90. <i>I-MR Chart</i> della perpendicolarità del foro: report di stabilità.	115
Figura 91. <i>I-MR Chart</i> della perpendicolarità del foro: report sommario.	116
Figura 92. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report di stabilità.	117
Figura 93. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report sommario.	118
Figura 94. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura superiore: report di stabilità.	119
Figura 95. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura superiore: report sommario.	120
Figura 96. <i>I-MR Chart</i> della rotondità del foro: report di stabilità.	121
Figura 97. <i>I-MR Chart</i> della rotondità del foro: report sommario.	122
Figura 98. <i>Xbar-R Chart</i> della concentricità del foro: report di stabilità.	124
Figura 99. <i>Xbar-R Chart</i> della concentricità del foro: report sommario.	125
Figura 100. <i>I-MR Chart</i> della conicità del foro: report di stabilità.	126
Figura 101. <i>I-MR Chart</i> della conicità del foro: report sommario.	127
Figura 102. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura inferiore: report di stabilità.	128
Figura 103. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura inferiore: report sommario.	129
Figura 104. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura superiore: report di stabilità.	130
Figura 105. <i>I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura superiore: report sommario.	131
Figura 106. <i>Xbar-R Chart</i> del diametro del foro: report di stabilità.	132
Figura 107. <i>Xbar-R Chart</i> del diametro del foro: report sommario.	133
Figura 108. <i>I-MR Chart</i> della perpendicolarità del foro: report di stabilità.	134
Figura 109. <i>I-MR Chart</i> della perpendicolarità del foro: report sommario.	135
Figura 110. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report diagnostico.	136
Figura 111. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report di stabilità.	137
Figura 112. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report sommario.	138
Figura 113. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura superiore: report di stabilità.	139
Figura 114. <i>I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura superiore: report sommario.	140
Figura 115. <i>I-MR Chart</i> della rotondità del foro: report di stabilità.	141
Figura 116. <i>I-MR Chart</i> della rotondità del foro: report sommario.	142
Figura 117. Valutazione differenze su linea centrale e limiti di controllo.	145
Figura 118. <i>Before/After Xbar-R Chart</i> della concentricità del foro: report diagnostico.	146
Figura 119. <i>Before/After Xbar-R Chart</i> della concentricità del foro: report sommario.	147
Figura 120. <i>Before/After I-MR Chart</i> della conicità del foro: report diagnostico.	148
Figura 121. <i>Before/After I-MR Chart</i> della conicità del foro: report sommario.	149
Figura 122. <i>Before/After I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura inferiore: report diagnostico.	150
Figura 123. <i>Before/After I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura inferiore: report sommario.	151

Figura 124. <i>Before/After I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura superiore: report diagnostico.	152
Figura 125. <i>Before/After I-MR Chart</i> del diametro dell'alesatura superiore: report sommario.	153
Figura 126. <i>Before/After Xbar-R Chart</i> del diametro del foro: report diagnostico.....	154
Figura 127. <i>Before/After Xbar-R Chart</i> del diametro del foro: report sommario.	155
Figura 128. <i>Before/After I-MR Chart</i> of diametro foro (centro inferiore, punto 1): report sommario.....	156
Figura 129. <i>Before/After I-MR Chart</i> of diametro foro (centro superiore, punto 2): report sommario.....	157
Figura 130. <i>Before/After I-MR Chart</i> of diametro foro (superiore, punto 3): report sommario.	158
Figura 131. <i>Before/After I-MR Chart</i> del diametro del foro (inferiore, punto 4): report sommario.....	159
Figura 132. <i>Before/After I-MR Chart</i> della perpendicolarità del foro: report diagnostico.	160
Figura 133. <i>Before/After I-MR Chart</i> della perpendicolarità del foro: report sommario.	161
Figura 134. <i>Before/After I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report diagnostico.	162
Figura 135: <i>Before/After I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura inferiore: report sommario.	163
Figura 136. <i>Before/After I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura superiore: report diagnostico.	164
Figura 137. <i>Before/After I-MR Chart</i> della rotondità dell'alesatura superiore: report sommario.	165
Figura 138. <i>Before/After I-MR Chart</i> della rotondità del foro: report diagnostico.....	166
Figura 139. <i>Before/After I-MR Chart</i> della rotondità del foro: report sommario.	167

Indice delle tabelle

Tabella 1. Elenco parametri per ciascuna prova.	71
Tabella 2. Elenco parametri per ciascuna prova con relativa durata simulata su CAM.	72
Tabella 3. Elenco parametri per ciascuna prova con relativa durata simulata su CAM, dopo aver variato il piano degli esperimenti.	73
Tabella 4. Valori dell'usura rilevati per ciascuna delle prove.	76
Tabella 5. Pattern/andamenti osservabili nel grafico citato ed associazioni con eventuali cause.	85
Tabella 6. Pattern/andamenti osservabili nel grafico citato ed associazioni con eventuali cause.	86

Bibliografia

- (s.d.). Tratto da <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/>
- (s.d.). Tratto da <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=RNGN120700T01020%20%20%20%20670>
- (s.d.). Tratto da <https://www.qualitiamo.com/articoli/Il%20metodo%20Taguchi.html>
- A. Fortunato, A. A. (2016). *Tecnologia meccanica, introduzione alle lavorazioni per asportazione di truciolo*. Società editrice Esculapio.
- Appunti e slides del corso di "Sistemi integrati di produzione". (s.d.).
- Appunti e slides del corso di "Tecnologia meccanica". (s.d.).
- Brandimarte, P. (2011). *Quantitative Methods: An Introduction for Business Management*. Wiley.
- Carl Zeiss, Industrielle Messtechnik GmbH. (2018, November). ZEISS DuraMax Specifications.
- DMG Mori. (2017). pm3it-dmu-dmc-monoblock-series-pdf-data.
- L. Felloni, A. G. (1997). ON THE PERFORMANCE OF A CRN COATED SIC WHISKERS REINFORCED CERAMIC TOOL HIGH SPEED MACHINING OF NI-BASE SUPER ALLOYS. *INDUSTRIAL CERAMICS*, 17(3).
- Latrobe speciality steel company. (2008). Lescalloy M50 VIM-VAR, High performance bearing steel, datasheet.
- Leica Microsystems IR GmbH. (2013). Leica DMS300 Brochure IT.
- Levine D. M., K. T. (2010). *Statistica*. Pearson Education Italia.
- Marco Santochi, F. G. (2000). *Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione* (Seconda edizione ed.). Casa editrice Ambrosiana.
- Montgomery, D. C. (2006). *Controllo statistico della qualità* (Seconda ed.). McGraw-Hill.
- Righton. (2016). AMS6491 - M50 datasheet.
- Sandvik Coromant. (2010). Ceramiche - Per lavorazioni efficienti e ad alta produttività delle superleghe.
- Serpe Kalpakjian, S. R. (2008). *Tecnologia meccanica* (5 ed.). Pearson.
- Serpe Kalpakjian, S. R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology* (Sixth edition in SI units ed.). Pearson.

Ringraziamenti

Colgo l'occasione per ringraziare tutti coloro che hanno contribuito con il loro aiuto alla realizzazione di questo lavoro di tesi.

In primis il mio relatore, il prof. Luca Iuliano, per il supporto e le indicazioni fornitemi durante la realizzazione di questo lavoro.

Poi il mio tutor aziendale, il manager dell'ufficio del *Process Engineering*, il sig. Enzo Rosano, il sig. Dario Tettamanti e tutto il personale dell'ufficio del *Process Engineering*, per avermi guidato, supportato, sopportato e dato fiducia, durante tutte le fasi di realizzazione del lavoro, facendomi sentire subito a mio agio e parte di un gruppo, nonostante fossi l'ultimo arrivato.

Un ringraziamento anche agli operatori del canale di produzione *LBC (Large Bearing Channel)* ed al personale del laboratorio, per l'aiuto e la disponibilità esibiti nei miei confronti, guidandomi anche nell'utilizzo delle svariate attrezzature.

Vorrei ringraziare anche tutti i colleghi e gli amici, in sede e non, che durante il percorso, seppur non facile, hanno condiviso con me momenti, più o meno difficili, incoraggiandomi e sostenendomi sempre.

Infine, un ringraziamento particolare lo riservo alla mia famiglia, per il sostegno, non solo economico, nonostante la distanza.